

# بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيْمِ

## فصلنامه زمین‌شناسی ایران



پژوهشکده علوم پایه کاربردی



سال ۱۹، شماره ۷۳، بهار ۱۴۰۴

صاحب امتیاز:

پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاددانشگاهی

مدیر مسئول:

دکتر کمال خدایی، دانشیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

سردبیر:

دکتر محمدحسین آدابی، استاد دانشگاه شهیدبهشتی

همکار سردبیر:

دکتر حمیدرضا ناصری، استاد دانشگاه شهیدبهشتی

هیئت تحریریه:

دکتر محمدحسین آدابی، استاد دانشگاه شهیدبهشتی

دکتر حمیدرضا ناصری، استاد دانشگاه شهیدبهشتی

دکتر محمدرضا رضایی، استاد دانشگاه کرتین استرالیا

دکتر عزت ا... رئیسی، استاد دانشگاه شیراز

دکتر عبدال... سعیدی، دانشیار سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

دکتر فریدون غضبان، استاد دانشگاه تهران

دکتر سید محمود فاطمی عقدا، استاد دانشگاه خوارزمی

دکتر منوچهر قرشی، دانشیار سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

دکتر محمد قویدل، استاد انسیتو نفت دانشکده فنی دانشگاه تهران

دکتر فرید مر، استاد دانشگاه شیراز

دکتر رضا موسوی حرمسی، استاد دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر سعید میرزایی، استاد پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاددانشگاهی

دکتر منصور وثوقی عابدینی، دانشیار دانشگاه شهیدبهشتی

دکتر کمال خدایی، دانشیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاددانشگاهی

دکتر اصغر کهنلند، دانشیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاددانشگاهی

مدیر داخلی: دکتر راحله هاتفی، استادیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

مدیر اجرایی: انسیه اسماعیلی

ویراستارها: دکتر حمیدرضا ناصری و ناعمه فائضی

صفحه آرا: آرزو انصاری

تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۴

چاپ: تویس

نشانی: انقلاب، ابتدای خیابان آزادی، روبروی بانک ملت، پلاک ۳۸

نشانی دفتر فصلنامه:

تهران، اوین، دانشگاه شهیدبهشتی، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاددانشگاهی، صندوق پستی: ۱۹۶۱۵۱۱۷۱

تلفن: ۰۲۹۰۰۲۵۹۴، ۰۲۴۳۱۹۳۳-۴

پست الکترونیک: zaminshenasiiran@yahoo.com

وب سایت فصلنامه: Journal.rias.ac.ir

وب سایت پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی: www.rias.ac.ir

این فصلنامه دارای مجوز علمی- پژوهشی به شماره ۳/۳۰۹ مورخ ۸۷/۱/۲۸ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری می‌باشد.

این نشریه در پایه استنادی علوم جهان اسلام و نیز ایران ژورنال (نظام نمایه‌سازی مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی علوم و فناوری) نمایه شده است و دارای ضریب تاثیر می‌باشد. همچنین این نشریه در پایگاه‌های اطلاع‌رسانی زیر قابل دسترس است:

<http://www.isc.gov.ir>; <http://www.srlst.com>; <http://www.sid.ir>; <http://www.magiran.com>

## راهنمای نگارش مقالات

فصلنامه زمین‌شناسی ایران هر سه ماه یک بار منتشر می‌شود و در زمینه‌های تخصصی زمین‌شناسی مقاله می‌پذیرد. هر مقاله تحقیقی فارسی باید دارای عنوان، چکیده فارسی، واژه‌های کلیدی به فارسی، مقدمه، روش مطالعه، بحث و نتیجه‌گیری، منابع، چکیده انگلیسی و واژه‌های کلیدی به انگلیسی باشد و اصول زیر در آن رعایت شود.

- متن مقاله باید با فاصله سطر ۱ cm و با رعایت حاشیه ۳ سانتی‌متر از لبه‌ها و قلم فارسی B Nazanin ۱۳ و انگلیسی ۱۱ Times New Roman در نرم‌افزار Word تایپ و تصاویر در فولدر جداگانه با فرمت Jpeg Tiff یا به نشانی zaminshenasiiran@yahoo.com به دفتر مجله ارسال شود (حداکثر تعداد صفحات مقاله ۱۵ صفحه می‌باشد).

- مقاله باید دارای یک برگ مشخصات مقاله به‌طور جداگانه شامل نام و نام خانوادگی نویسنده (گان)، مرتبه علمی و آدرس به هر دو زبان فارسی و انگلیسی، شماره تلفن و فاکس و پست الکترونیکی باشد.

- چکیده باید محتوای مقاله را با تأکید بر روش‌ها، نتایج و اهمیت و کاربرد نتایج بازگو نماید و حداکثر در ۲۵۰ کلمه نوشته شود. چکیده انگلیسی باید کاملاً منطبق با چکیده فارسی باشد.

- واژه‌های کلیدی تا پنج مورد به‌ترتیب حروف الفبا بلا فاصله بعد از چکیده‌های فارسی و انگلیسی آورده شود.

- در صورت نیاز "سپاسگزاری" قبل از فهرست منابع آورده شود.

- منابع فارسی و به دنبال آن منابع خارجی به‌ترتیب حروف الفبا آورده شود. به عنوان مثال:  
بابایی، م. و حسنی، ی.، ۱۳۸۳. الگوی سیستم زهکشی در معادن. فصلنامه تحقیقات منابع آب، ۱۲، ۲۷-۴۱.

Bellon, H., and Braud, J., 2003. Carbonate Sedimentary Environment, John Wiley, 360.

Cliff, R.A., Droop, G.T., and Rex, D., 1985. Alpine metamorphic in the south-east Tauern Window. Journal of Metamorphic Geology, 3, 403-415.

- در صورتی که از مقاله‌های اینترنتی استفاده شده است در فهرست منابع آورده شود. چنانچه مقاله‌ای دارای شماره doc. است در ادامه منابع آورده شود.

- برای ارجاع به منابع در متن از نام نویسنده‌گان و سال انتشار منبع استفاده گردد.

- در متن مقاله از آوردن کلمات انگلیسی (به استثنای اسمی جنس و گونه فسیل‌ها و اسمی نویسنده‌گان) خودداری شود و واژه‌ها (با ذکر شماره) در پاورقی آورده شود.

- عناوین جدول‌ها در بالا و عناوین شکل‌ها در زیر آنها نوشته شود. فقط از واژه شکل برای کلیه نمودارها و تصاویر استفاده شود. کلیه تصاویر میکروسکوپی همراه با مقیاس در زیر عکس باشد.

ارسال نسخه اصل شکل‌ها در ابتدای ارسال مقاله ضروری است.

نوشتار و اعداد روی شکل‌ها کاملاً خوانا باشد.

- برگ تعهد را امضا نموده و تا دریافت پاسخ نهایی نشریه، از ارسال آن به سایر نشریات خودداری فرمایید.

- مجله در ویراستاری، رد یا پذیرش مقالات مختار است.

# ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای: روش اکتشافی بهینه برای بررسی کانه‌زایی مس در گستره چاه رستم، جنوب بیرجند

سمیه مرادی<sup>۱</sup>، مسعود علیپوراصل<sup>(۲)</sup>\* و افشین اکبرپور<sup>۳</sup>

- دانشآموخته کارشناسی ارشد، گروه پترولوزی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
- دانشیار، گروه پترولوزی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
- استادیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

## چکیده

گستره اکتشافی چاه رستم در بلوك لوٽ و در شمال‌غربی نهبندان در جنوب بیرجند واقع است. واحدهای آتشفشاری و آذرآواری ائوسن-الیگوسن با ترکیب آندزیت و آندزیت بازالت پورفیری بخش عمده‌ای از این گستره را پوشش می‌دهند و بوسیله سنگ‌های نفوذی و نیمه‌نفوذی ائوسن پسین-الیگوسن با ترکیب گرانودیبوریت، مونزودیبوریت، کوارتز دیبوریت پورفیری و دایک‌های داسیتی قطع شده‌اند. سیالات گرمابی مربوط به توده‌های نیمه‌نفوذی-نفوذی در کانه‌زایی مس و عناصر همراه در این ناحیه نقش مهمی داشته‌اند. نمونه‌ها از بخش منهای ۸۰ مش رسوبات بستر آبراهه‌ها برآشت شدند و پس از نرمایش، برای عنصر طلا با روش فایراسی و تعداد ۲۲ عنصر با استفاده از روش طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی نشر نوری تجزیه شده است. تحلیل‌های آماری تک‌متغیره و چندمتغیره داده‌های ژئوشیمیابی رسوب آبراهه‌ای، ناهنجاری‌های عنصر مس، طلا، روی، سرب، مولیبدن، آرسنیک، آنتیموان و منگنز را در گستره چاه رستم نشان می‌دهد. هم‌بافتی ژئوشیمیابی عناصر در نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای، بیان از رخداد احتمالی کانه‌زایی‌های مس پورفیری و اپی‌ترمال (بهویژه سامانه اپی‌ترمال) در این گستره دارد. مطالعه سنگ ژئوشیمیابی نمونه‌های انتخابی از رخنمون‌های سنگی و مغزه‌های حفاری در مناطق ناهنجاری رسوب آبراهه‌ای، قابلیت روش ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای در ثبت هاله‌های ژئوشیمیابی مرتبط با سامانه‌های کانه‌زایی را تایید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: جنوب بیرجند، چاه رستم، ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای، کانه‌زایی مس.

## مقدمه

روش ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای در مرحله شناسایی و پی‌جویی مواد معدنی محسوب می‌شود. یکی از کاربردهای اساسی این روش، ثبت هاله‌های لیتوژئوشیمیابی ثانویه اکتشافات سیستماتیک مواد معدنی شامل مراحل شناسایی، پی‌جویی، اکتشافات عمومی و تفصیلی می‌باشد.

\* نویسنده مرتبط: masoodalipour@shahroodut.ac.ir

(Malekzadeh Shafaroudi et al., 2015) پورفیری ماهرآباد (ملک‌زاده شفارودی و کریم پور، ۱۳۹۰)، کانسار طلای شادان در جنوب‌غرب بیرون گردید (Yazdi et al., 2023)، کانسار مس چشمۀ خوری در بلوک لوت (Javidi et al., 2019)، طلا-قلع هیرد (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۶)، مس-مولیبدن رگه‌ای-پورفیری ده سلم و چاه شلغمی (ارجمندزاده، ۱۳۹۰)، چندفلزی ماهور (یونسی و همکاران، ۱۳۹۶) و سرب و روی سه‌چنگی (Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2015) مؤید آن است. این رخدادهای کانه‌زایی با ماگماتیسم غنی از پاتاسیم ائوسن میانی تا الیگوسن پسین در کمریند ماقمایی شرق ایران مرتبط هستند (omidianfar et al., 2020).

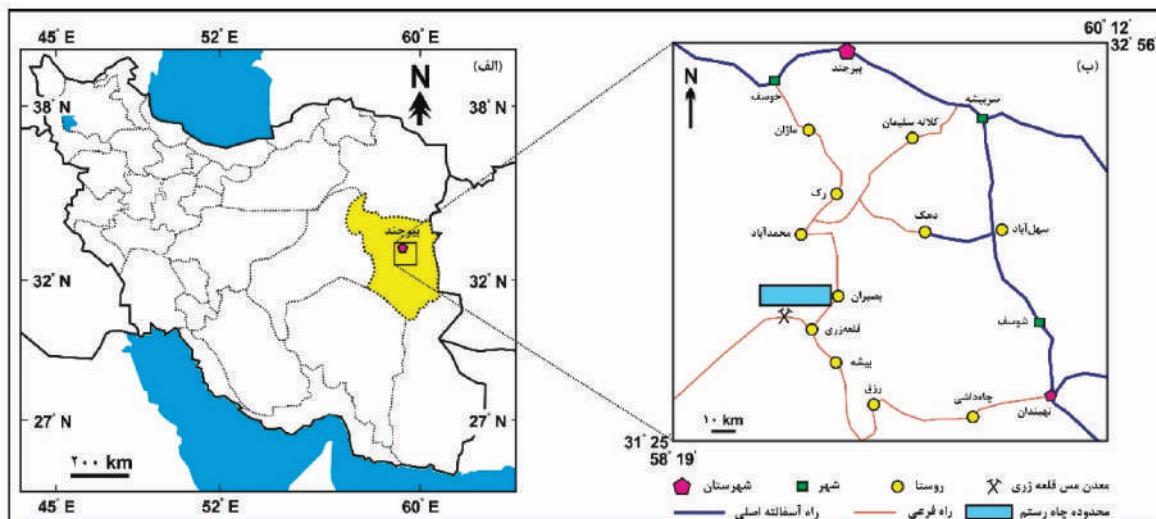
اهمیت بالای مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافی در بلوک لوت وجود آثار کانه‌زایی مس و عناصر همراه در گستره چاه رستم، استفاده از روش ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای برای ثبت ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی مرتبط با سامانه‌های کانه‌زایی را در این گستره ضرورت می‌بخشد.

## روش مطالعه

در این پژوهش، طراحی و برنامه‌ریزی برای برداشت ۳۶ نمونه رسوب آبراهه‌ای در حوضه‌های آبریز انجام شد. نمونه‌های ژئوشیمی آبراهه‌ای از جزء منهای ۸۰ مس رسوبات بستر آبراهه‌ها برآشت شدند. این نمونه‌ها پس از نرمایش، برای عنصر طلا با روش غال‌گذاری (F.A.) و تعداد ۲۲ عنصر با استفاده از روش طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی نشر نوری (ICP-OES) در آزمایشگاه مطالعات موادمعدنی زرآزما تجزیه شده است. تحلیل‌های آماری تک‌متغیره و چندمتغیره داده‌های ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای در محیط نرمافزار 21 IBM SPSS Statistics انجام شده است. بر اساس نتایج پردازش‌های آماری، نقشه‌های ناهنجاری ژئوشیمیایی تک‌عنصری و چندعنصری در محیط نرمافزار Arc GIS 10.6 رسوم شد و از ترکیب نقشه‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای، مناطق امیدبخش معدنی انتخاب شده است. در مرحله کنترل صحرایی ناهنجاری‌های ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای، برای مطالعات سنگ‌ژئوشیمیایی از

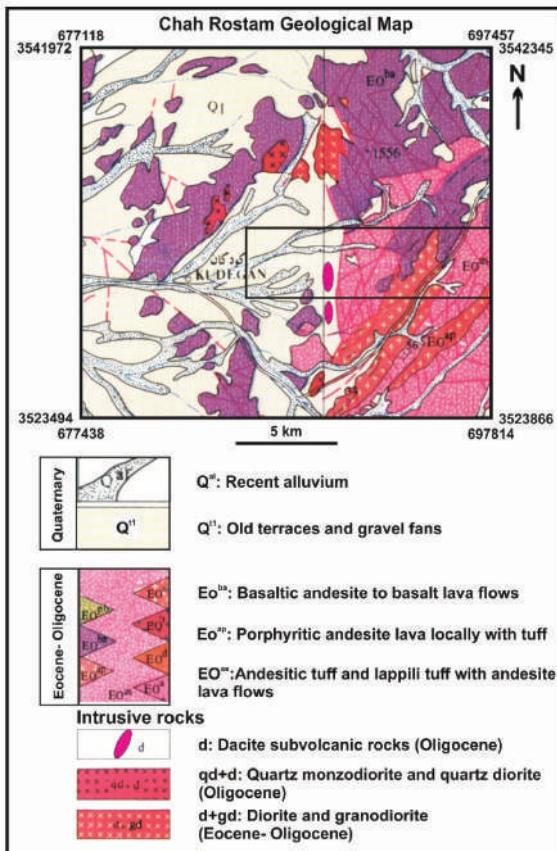
عناصر در محیط پیرامون سامانه‌های کانه‌زایی است. تلفیق یافته‌های ژئوشیمیایی با داده‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، دگرسانی و سنجش از دور برای معرفی پتانسیل‌های کانه‌زایی استفاده می‌شوند (مدبری و همکاران، ۱۴۰۱).

گستره اکتشافی چاه رستم با مساحتی حدود ۴۰ کیلومتر مربع در مختصات جغرافیایی "۳۴° ۵۷' ۰۶" و "۳۴° ۵۷' ۳۴" تا "۳۱° ۵۳' ۳۸" طول شرقی و "۳۱° ۲۳' ۰۰" عرض شمالی، در نه کیلومتری شمال معدن مس قلعه‌زی، حدود پنج کیلومتری غرب آبادی بصیران، فاصله ۱۰ کیلومتری شمال غرب نهبندان در استان خراسان جنوبی واقع است (شکل ۱-الف، ب). مناسب‌ترین راه دسترسی به گستره اکتشافی چاه رستم، جاده قلعه‌زی- بصیران است. گستره چاه رستم بخش کوچکی از چهارگوش زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ ده سلم (سه‌هندی و همکاران، ۱۳۷۱) و چهارگوش‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ (بصیران (بهروزی و همکاران، ۱۳۷۱) و کودکان (بلوریان، ۱۳۸۷) می‌باشد. اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک در ورقه‌های طلا، سرب، روی و عناصر همراه را در بخش‌هایی از این ورقه‌ها نشان می‌دهد و گستره اکتشافی چاه رستم یکی از مناطق امیدبخش معدنی است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۹، ۱۳۸۸). از آنجایی که بر روی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی این ورقه‌ها کنترل‌های صحرایی و چکشی دقیقی انجام نشده است، اکتشافات ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای در مقیاس بزرگ‌تر با برداشت تعداد نمونه بیشتر در واحد سطح و کنترل‌های صحرایی با برداشت نمونه‌های سنگ و در نهایت حفر گمانه‌های اکتشافی پتانسیل کانه‌زایی این گستره را آشکار می‌سازد. پنهانه مورد بررسی، بخشی از کمان آتش‌شانی-نفوذی سنوزوییک در بلوک لوت است. این کمریند ماقمایی مستعد شکل‌گیری کانسارهای پورفیری، اسکارن، رگه‌ای چندفلزی، رگه‌ای اپی‌ترمال و ... است. وجود معادن، کانسارها و اندیس‌های شناخته شده مس، طلا، مولیبدن، سرب، روی، آهن و غیره از قبیل معدن مس قلعه‌زی (Karimpour) (et al., 2005)، کانسارهای طلا-مس پورفیری خوبیک



شکل ۱. (الف) موقعیت گستره اکتشافی چاه رستم در استان خراسان جنوبی، (ب) موقعیت جغرافیایی گستره چاه رستم نسبت به شهرهای بیرجند و نهبندان و راههای دسترسی به گستره اکتشافی

سن آئوسن-الیگوسن و سنگ‌های نفوذی و نیمه‌نفوذی با ترکیب گرانودیوریت، دیوریت، کوارتز دیوریت، مونزونودیوریت و داسیت (آئوسن پسین-الیگوسن) وجود دارد (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی گستره اکتشافی چاه رستم (اقتباس شده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ ده سلم (سهندی و همکاران، ۱۳۷۱))

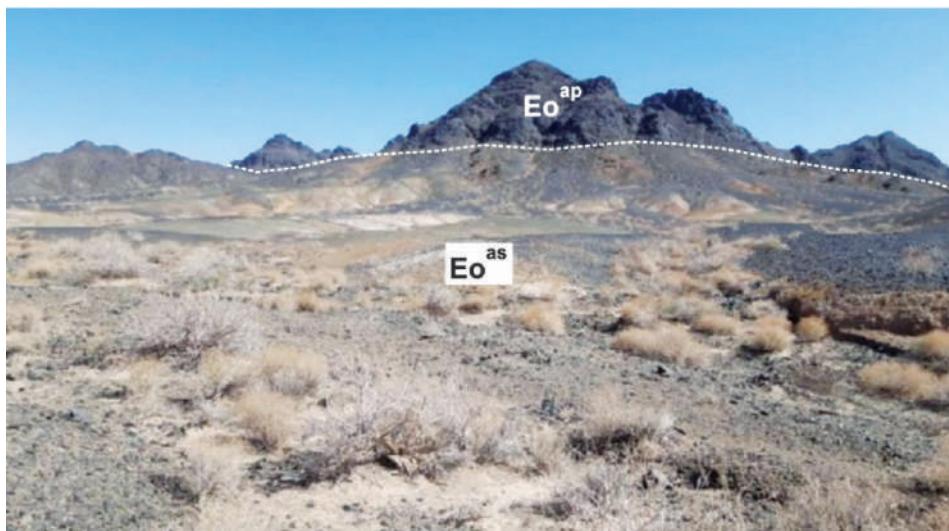
رخنمون کانه‌زائی‌ها و دگرسانی‌ها نمونه‌گیری صورت گرفت. در ادامه، بر اساس یافته‌های ژئوشیمیابی رسوب آبراهه‌ای و سنگ‌ژئوشیمیابی مرحله اکتشاف چکشی (کنترل ناهنجاری) تعداد چهار گمانه اکتشافی حفر شده است. از معزه‌های حفاری برای مطالعات سنگنگاری، کانه‌نگاری و سنگ‌ژئوشیمیابی نمونه‌برداری انجام شده است. در نهایت، بر پایه نتایج بررسی‌های ژئوشیمیابی رسوب آبراهه‌ای، کنترل ناهنجاری و معزه‌های حفاری، برای ادامه مطالعات در گستره چاه رستم نتیجه‌گیری شده است.

## زمین‌شناسی

گستره اکتشافی چاه رستم، در تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌ساختی ایران در خردقاره ایران مرکزی و بلوك لوت قرار دارد. این گستره در چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰ ده سلم (چاهوک) به شماره K9 (سهندی و همکاران، ۱۳۷۱)، چهارگوش‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ به شماره ۷۸۵۳ (پهروزی و همکاران، ۱۳۷۱) و کودکان به شماره ۷۷۵۳ (بلوریان، ۱۳۸۷) قرار دارد. بر پایه اطلاعات نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ و مشاهدات صحرایی مطالعه حاضر، در گستره اکتشافی چاه رستم رخنمونی از سنگ‌های آتشفشانی و توف‌های آندزیتی، آندزیت بازالتی و بازالت به

(به صورت توده‌های کوچک و دایک) نیز در این واحد سنگی مشاهده می‌شود. گدازه‌های آندزیتی دارای بافت پورفیری با زمینه میکرولیتی است و متشکل از پلازیوکلاز، آمفیبول، پیروکسن، آلكالی‌فلدسپار و بیوتیت هستند. کانی‌های فرعی و ثانویه این سنگ‌ها عبارت از آپاتیت، کلریت، اپیدوت، کلسیت و کانی‌های کدر است. سنگ‌های آندزیتی در سطح ظاهری رنگ سبز تا خاکستری تیره دارند. در برخی از رخنمون‌ها، آندزیت‌ها دارای بافت مگاپورفیری است و در بردارنده بلورهای درشت پلازیوکلاز و آمفیبول می‌باشند.

**سنگ‌های آذرآواری:** این واحد سنگی بر روی نقشه زمین‌شناسی با علامت اختصاری EOas نشان داده شده است، که تناوبی از توف و گداره آندزیتی به سن ائوسن-الیگومن است (شکل ۲). این واحد که بیشتر در شمال شرق روستای متروکه کودکان گسترش دارد بیشتر از سنگ‌های آذرآواری نظیر توف و لایپلی توف با ترکیب آندزیتی تشکیل شده است و دارای میان‌لایه‌هایی از روانه‌های گدازه آندزیتی و به مقدار کمتر گدازه‌های آندزیت بازالتی است (شکل ۳). در موارد اندک سنگ‌های آذرین نیمه‌عمیق با ترکیب آندزیت



شکل ۳. همبری سنگ‌های آذرآواری با ترکیب توف و لایپلی توف آندزیتی (EO<sup>as</sup>) با گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی (EO<sup>ap</sup>) در گستره چاه رستم (نگاه به سمت شمال شرق)

درشت کانی‌های فرومینیزین (آمفیبول و پیروکسن) توسط کانی‌های ثانویه پر شده است. کانی‌های فرعی این سنگ‌ها شامل آپاتیت و کانی‌های کدر است. کانی‌های ثانویه نیز شامل سریسیت، کلریت، اپیدوت، کانی‌های رسی و کلسیت می‌باشد. این سنگ‌های گدازه‌ای از نظر ژئوشیمیابی در قلمرو سری کالکوآلکالن غنی از پتاسیم تا شوشومنیتی قرار دارند (بلوریان، ۱۳۸۷).

**سنگ‌های آذرین نفوذی و نیمه‌نفوذی:** در این منطقه، سنگ‌های آذرین نفوذی و نیمه‌نفوذی دارای ترکیب گرانوودیوریت، دیوریت، کوارتز دیوریت، مونزوودیوریت و داسیت می‌باشند. توده‌های مونزوودیوریت و کوارتز دیوریت (qd+d) در بخش مرکزی گستره چاه رستم رخنمون دارند (شکل ۲). این سنگ‌ها دارای بافت کاملاً گرانولار و درشت بلور است

**گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی:** این واحد سنگی بر روی نقشه زمین‌شناسی با علامت اختصاری EO<sup>ap</sup> نشان داده شده است و متشکل از روانه‌های آندزیتی، تراکی آندزیتی، آندزیت بازالتی با بافت پورفیری و به مقدار کمتر توف آندزیتی به سن ائوسن-الیگومن است (شکل ۲). این روانه‌های گدازه‌ای با لایبندی مشخص در صحراء دیده می‌شوند. شبیه لایبندی گدازه‌های این واحد در حدود ۳۰ درجه به سمت جنوب‌غربی است و به صورت کاملاً هم‌شبیب بر روی واحد آذرآواری (EO<sup>as</sup>) قرار می‌گیرند (شکل ۳). نتایج مطالعات سنگنگاری نمونه‌های این واحد نشان می‌دهد، آندزیت‌ها دارای بافت پورفیری است و درشت بلورهای پلازیوکلاز و آمفیبول در خمیره ریزدانه از پلازیوکلاز و آلكالی‌فلدسپار حضور دارند. همچنین قالب بلورهای

و اکسیدهای آهن تشکیل شده است. این سنگ‌ها از نظر ژئوشیمیایی در قلمرو سری کالکوآلکالن غنی از پتاسیم قرار دارند. سن این استوک و دایک‌های داسیتی الیگوسن گزارش شده است (سهندی و همکاران، ۱۳۷۱؛ بلوریان، ۱۳۸۷).

## طراحی، نمونه‌برداری و تجزیه ژئوشیمیایی نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای

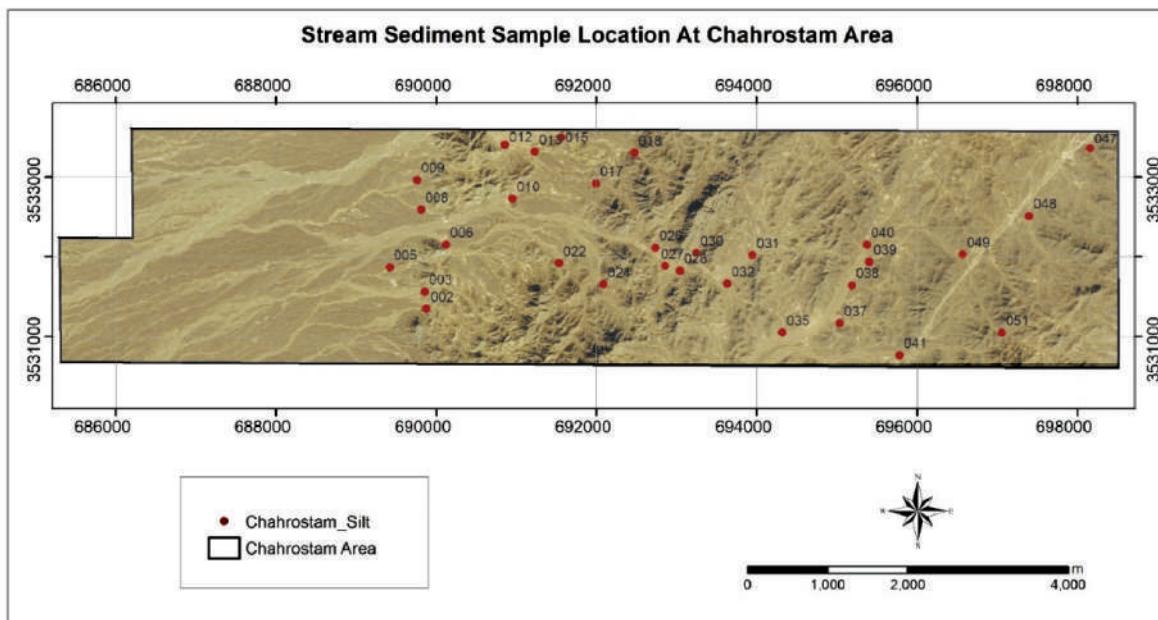
یکی از مراحل مهم و اساسی هر طرح اکتشاف ژئوشیمیایی، طراحی نقاط نمونه‌برداری است و به عنوان اساس و پایه مطالعات، بایستی به صورت بهینه انجام گیرد. در این پژوهش، نخست با بررسی نقشه‌های توپوگرافی ۲۵۰۰:۱ و تصاویر ماهواره‌ای گستره اکتشافی چاه رستم، حوضه‌های آبریز تکمیل شده است. سپس با استفاده از اطلاعات نقشه زمین‌شناسی منطقه، واحدهای سنگی مستعد کانه‌زایی، توده‌های نفوذی، همبری‌های مهم، دگرسانی‌ها، سامانه‌های گسلی و نقشه ژئومغناطیس هوایی، نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای در حوضه‌های آبریز طراحی شده است. در مجموع، تعداد ۳۶ نمونه رسوب آبراهه‌ای با تراکم یک نمونه به ازای هر کیلومتر مربع در این گستره تعیین شده است. نقشه موقعیت نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.6 Arc GIS ترسیم شده و مختصات مکانی نقاط نمونه‌برداری استخراج می‌شود. موقعیت نمونه‌های ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای در گستره چاه رستم در شکل ۴ نشان داده شده است.

به دلیل حساسیت بالای روش‌های ژئوشیمیایی و غلظت‌های پایین عناصر در بخش سیلتی رسوبات آبراهه‌ای، نمونه انتخابی باید معرف خوبی برای ایستگاه نمونه‌برداری باشد. در گام نخست، محل برداشت نمونه با استفاده از اطلاعات نقشه توپوگرافی و یا با استفاده از دستگاه سامانه موقعیت یاب جهانی تعیین می‌شود. در ایستگاه نمونه‌برداری، هر نمونه رسوب آبراهه‌ای متشكل از ۲۵ جزء نمونه است و در فاصله حدود ۵۰ متر از محل ایستگاه به سمت بالادرست آبراهه برداشت می‌شود. جزء نمونه‌ها از بخش‌های غیرفعال واقع در مرکز و نقل آبراهه انتخاب می‌شوند. در محل برداشت برای اجتناب از آلودگی‌های احتمالی و حذف مواد آلی بخش

و در سطح رخنمون کمی هوازده هستند. این سنگ‌ها به صورت توده‌های کوچک (استوک) در داخل سنگ‌های آشفتناقی تزریق شده‌اند و سنگ‌های پیرامونی را کمی دگرسان کرده‌اند، به طوری که تاثیر حرارتی سنگ‌های نفوذی بر سنگ‌های اطراف به طور کامل واضح است. این سنگ‌ها از پلازیوکلاز، آکالی فلدسپار، پیروکسن و بیوتیت تشکیل شده است. کانی‌های فرعی سنگ‌ها آپاتیت، زیرکن و کانی‌های کدر است. این سنگ‌ها از نظر ژئوشیمیایی در قلمرو سری کالکوآلکالن غنی از پتاسیم تا شوشونیتی قرار دارند. سن این توده‌ها و استوک‌های نفوذی در چهارگوش‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ و استوک ۱:۱۰۰۰۰۰ کودکان الیگوسن گزارش شده است (سهندی و همکاران، ۱۳۷۱؛ بلوریان، ۱۳۸۷). با این وجود، مطالعات سن سنجی به روش اورانیم-سرپ بر روی کانی زیرکن از سنگ‌های نفوذی مونزونیت و کوارتز مونزونیت در ناحیه کودکان (جنوب بیرجند)، سن‌های تبلور ۴۰/۹۶ ± ۰/۷۸ ± ۳۸ میلیون سال (ائوسن پسن، بارتونین) را برای سنگ‌های نفوذی آشکار می‌سازد (Omidianfar et al., 2020).

توده‌های دیوریت و گرانودیوریتی (d+gd)، در بخش‌های شمال و شمال شرق گستره چاه رستم رخنمون دارند (شکل ۲). این سنگ‌ها سالم و غیردگرسان هستند و دارای بافت دانه‌ای می‌باشند. کانی‌های اصلی آن‌ها شامل پلازیوکلاز، کوارتز، آکالی فلدسپار و هورنبلند است و کانی‌های فرعی و ثانویه آن‌ها از کلریت، اپیدوت، تورمالین و آپاتیت تشکیل شده است. این سنگ‌ها از نظر ژئوشیمیایی در قلمرو سری کالکوآلکالن غنی از پتاسیم تا شوشونیتی قرار دارند. سن این توده‌ها و استوک‌های نفوذی ائوسن پسین-الیگوسن گزارش شده است (سهندی و همکاران، ۱۳۷۱؛ بهروزی و همکاران، ۱۳۷۱؛ بلوریان، ۱۳۸۷).

استوک و دایک‌های نیمه عمیق داسیتی (d)، واحدهای سنگی دیگر را قطع می‌کنند (شکل ۲). این سنگ‌ها به رنگ روشن با بافت پورفیری و به مقدار کمی دگرسان هستند. کانی‌های اصلی آن‌ها شامل پلازیوکلاز، هورنبلند و پیروکسن است. زمینه این سنگ‌ها ریزدانه و تا حدودی میکرولیتی است. کانی‌های ثانویه آن‌ها از سریسیت، کلسیت



شکل ۴. نقشه موقعیت مکانی نمونه‌های ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای در گستره اکتشافی چاه رستم

با Zn, Y, V, Sb, Pb, P, Ni, Mo, Mn, Mg, Li, استفاده از روش ICP-OES تجزیه شده است. عنصر طلا نیز به طور جداگانه با استفاده از روش غالگذاری اندازه‌گیری شده است.

## بحث

**پردازش داده‌های ژئوشیمیابی رسوب آبراهه‌ای**  
در این پژوهش، پردازش داده‌های ژئوشیمیابی رسوب آبراهه‌ای به ترتیب شامل: بررسی داده‌های سنسورد، تحلیل‌های آماری تک متغیره (محاسبه آماره‌های توزیع و رسم نمودارهای هیستوگرام و احتمال توزیع فراوانی عناصر بر پایه داده‌های خام)، شناسایی مقادیر خارج از ریف و جایگزینی آن‌ها، نرمال‌سازی داده‌ها با استفاده از روش تبدیل لگاریتمی و تحلیل‌های آماری چند متغیره می‌باشد.

**بررسی داده‌های سنسورد**  
داده‌های سنسورد به داده‌هایی گفته می‌شود که مقدار آن‌ها بزرگتر از حد بالای حساسیت دستگاه یا کوچک‌تر از حد پایین حساسیت دستگاه باشند. داده‌های سنسورد زمانی ایجاد می‌شوند که روش‌های تجزیه‌ای به اندازه کافی برای ثبت مقادیر کوچک یک عنصر حساس نیستند و یا اینکه روش تجزیه بسیار حساس است و قابلیت ثبت تمرکز بالای

سطحی رسوبات آبراهه‌ای به ضخامت حدود پنج سانتی‌متر کnar زده شده و از بخش رس-سیلتی نمونه‌گیری انجام می‌شود. تمامی حجم رسوب ۲۵ جزء نمونه در هر ایستگاه با استفاده از الک شماره ۸۰ مش الک می‌شود. از رسوب زیر الک ۸۰ مش به روش تقسیم‌بخشی حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ گرم رسوب برداشت شده و در کیسه‌های پلاستیکی مناسب بسته‌بندی می‌شود و بر روی کیسه نمونه، شماره سریال نمونه یاد داشت می‌شود. برای هر ایستگاه نمونه‌برداری، مشخصاتی از قبیل رنگ رسوب، دانه‌بندی رسوب، جنس غالب قطعات سنگی سازنده رسوب آبراهه‌ای، اثرات کانه‌زایی و دگرسانی در اجزای رسوبات بستر آبراهه، زمین‌شناسی، دگرسانی و کانه‌زایی پیرامون ایستگاه نمونه‌گیری در دفترچه صحرایی یادداشت می‌شود. در ادامه، حدود ۱۵۰ گرم از رسوب زیر ۸۰ مش برای همگن‌سازی تا اندازه زیر ۲۰۰ مش آسیاب می‌شود. در حدود یک تا پنج گرم از نمونه پودر شده در مخلوط اسید نیتریک و اسید هیدروکلریک (تیزاب سلطانی) در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت حل می‌شود. در اثر این شرایط فازهای جذب سطحی، اکسیدی و سولفیدی عناصر حل می‌شود (تخربی شیمیابی جزئی). در گام نهایی، محلول نمونه‌ها برای عناصر La, Fe, Cu, Cr, Co, Ce, Cd, Ca, As, Al, Ag

داده‌های خام حاصل از تجزیه‌های ژئوشیمیابی پس از بررسی و جایگزینی داده‌های سنسورد، در محیط نرمافزار IBM SPSS Statistics 25 آماری توزیع و رسم نمودارهای ستونی و احتمال فراوانی مورد تحلیل قرار گرفت. مهم‌ترین و جامع‌ترین اطلاعات آماری با محاسبه پارامترهای آماری داده‌های یک جامعه قابل دست‌یابی است. بنابراین برای اطلاع از میانگین غلظت عناصر، نحوه پراکندگی داده‌ها پیرامون میانگین، نوع تابع توزیع و غیره پارامترهای آماری محاسبه می‌شود. پارامترهای آماری عبارت از میانگین، میانه، مد، انحراف معیار، پراش، چولگی، کشیدگی، کمینه، بیشینه و دامنه داده‌ها می‌باشد. در گستره اکتشافی چاه رستم، پارامترهای آماری برای عناصر بر اساس داده‌های ژئوشیمیابی خام محاسبه شده است و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. با بررسی داده‌های پارامترهای آماری می‌توان اطلاعات با ارزشی را در ارتباط با رفتار ژئوشیمیابی، شکل تابع توزیع، تهمی‌شدگی، غنی‌شدگی و تمرکز غیرعادی عناصر در جامعه بدست آورد. این ویژگی‌ها از نظر ژئوشیمی اکتشافی برای ارزیابی اهمیت عناصر بسیار سودمند می‌باشد. در ادامه، پارامترهای آماری و ویژگی‌های ژئوشیمیابی برخی از عناصر مهم از قبیل نقره و مس در گستره اکتشافی چاه رستم به اختصار شرح داده می‌شود و برای اطلاع از ویژگی و رفتار ژئوشیمیابی عناصر دیگر به داده‌های جدول ۱ مراجعه شود.

عنصر نقره ( $Ag$ ): مقادیر غلظت نقره در نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای گستره چاه رستم از کمینه  $/22$ ،  $0/29$  گرم در تن تا بیشینه  $/57$  گرم در تن تغییر می‌کند و مقدار متوسط آن  $0/29$  گرم در تن است. در یک توزیع متقارن (نرمال) مقادیر چولگی و کشیدگی به ترتیب  $0$  و  $3$  می‌باشد. در آمارهای توزیع عنصر نقره در گستره چاه رستم مقادیر چولگی و کشیدگی توزیع به ترتیب  $2/91$  و  $12/20$  است. بیان از توزیع غیرمتقارن (لاگنرمال) با تمایل به سمت راست (چولگی مثبت) می‌باشد (جدول ۱). وجود نمونه‌های عیار بالا و با فراوانی اندک در یک جامعه آماری عامل اصلی چولگی توزیع به سمت راست می‌باشد. به طور معمول در این نوع از جوامع آماری می‌توان ناهنجاری مثبت عناصر را انتظار داشت. لازم

عناصر را ندارد. وجود نمونه‌های دارای مقادیر سنسورد در یک سری داده ژئوشیمیابی، استفاده از نرمافزارهای کاربردی را برای تحلیل‌های آماری، زمین‌آماری و رسم نقشه‌های ناهنجاری با مشکل مواجه می‌سازد. بنابراین قبل از شروع پردازش‌های ژئوشیمیابی باید نمونه‌های دارای مقادیر سنسورد شناسایی و جایگزین شوند. برای جایگزینی و اصلاح داده‌های سنسورد از روش‌های جایگزینی ساده، ترسیمی و بیشترین درست‌نمایی کوهن استفاده می‌شود (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). در روش جایگزینی ساده، مقادیر کمتر از حد حساسیت دستگاه با  $3/4$  حد حساسیت پایین و مقادیر بیشتر از حد حساسیت دستگاه با  $4/3$  حد حساسیت بالا جایگزین می‌شود. روش جایگزینی ساده زمانی نتایج قابل قبولی خواهد داشت و درصد نمونه‌های دارای مقادیر سنسورد در سری داده‌ها کمتر از  $10$  درصد کل داده‌ها باشد. در این مطالعه، حد قابل ثبت روش‌های اندازه‌گیری برای عنصر طلا پنج میلی‌گرم در تن، عناصر نقره، آرسنیک، مولیبدن، آنتیموان، کادمیوم و ایتریم پنج دهم گرم در تن، سریم، کبات، کروم، مس، لانتانیم، لیتیم، نیکل، سرب، وانادیم و روی یک گرم در تن، منگنز، فسفر و توریم پنج گرم در تن، گوگرد  $50$  گرم در تن و آلومینیم، کلسیم، آهن و منیزیم  $100$  گرم در تن هستند. در این پژوهش، مقادیر غلظت عنصر طلا در تمامی نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای کمتر از پنج میلی‌گرم در تن بوده است و این عنصر از روند پردازش‌های آماری و رسم نقشه‌های ناهنجاری حذف شده است. مقدار غلظت عنصر مولیبدن در نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای شماره‌های  $5$ ،  $18$ ،  $22$ ،  $28$ ،  $38$ ،  $41$ ،  $47$  و  $52$  کمتر از پنج دهم گرم در تن هستند و با  $3/4$  حد حساسیت دستگاه (یعنی  $375/0$ ) جایگزین شده است. عناصر دیگر فاقد داده سنسورد می‌باشند.

### تحلیل‌های آماری تک‌متغیره

در مطالعات آماری تک‌متغیره، پردازش بر روی مقادیر یک متغیر بدون در نظر گرفتن بقیه متغیرها صورت می‌گیرد. این مطالعات شامل محاسبه پارامترهای آماری و رسم نمودارهای ستونی و احتمال فراوانی است. تمامی

دروغین تشخیص داد. نمودارهای ستونی فراوانی و احتمال عنصر نقره نیز همانند داده‌های جدول پارامترهای آماری (جدول ۱)، شکل نامتقارن توزیع و تمایل آن به سمت راست را نشان می‌دهد (شکل ۵-الف، ب). در گستره چاه رستم، میانگین نقره در جامعه رسوب آبراهه‌ای (۰/۲۹ گرم در تن) در مقایسه با متوسط فراوانی پوسته‌ای آن (۰/۰۷۵ گرم در تن) در حدود چهار برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهد.

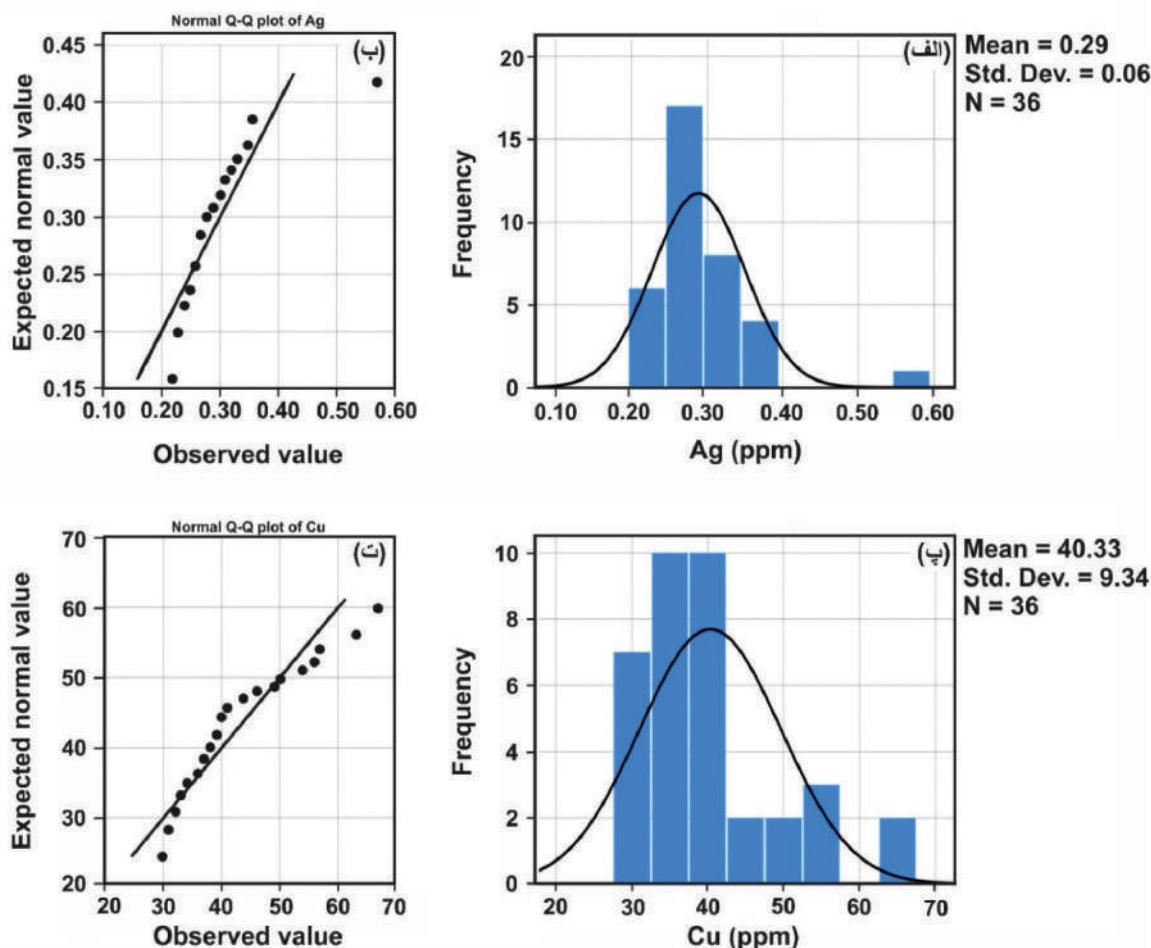
جدول ۱. پارامترهای آماری عناصر بر پایه داده‌های خام ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای در گستره چاه رستم (گرم در تن)

Statistics raw data	Ag	Al	As	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	La	Li	Mg	Mn	Mo	Ni	P	Pb	Sb	V	Y	Zn	
Mean	0.29	21285	10.05	38074	0.19	30	18	59	40	43089	15	15	13483	807	0.49	52	625	13	0.91	160	10	82	
Median	0.27	20640	8.90	38964	0.19	31	18	60	39	43934	15	15	13268	820	0.52	53	621	14	0.92	170	10	84	
Mode	0.26	19223	8.00	30680	0.19	31	15	60	39	33217	15	16	13448	708	0.38	53	609	6	0.92	106	10	71	
Std. Deviation	0.06	1871	3.66	3313	0.01	2	2	6	9	6498	1	1	1020	83	0.07	3	39	9	0.05	39	0	10	
Variance	0.00	3502497	13.38	10974300	0.00	3	6	36	87	42218580	1	2	1040186	6905	0.00	9	1540	78	0.00	1509	0	95	
Skewness	2.91	1.40	1.63	-0.50	0.11	-0.57	0.63	0.01	1.34	0.06	-0.28	-0.68	0.98	0.12	-1.03	-1.56	0.29	1.61	0.32	0.05	-1.04	0.48	
Kurtosis	12.20	2.01	2.80	-0.69	-0.35	0.82	0.41	-0.68	1.30	-1.29	-0.15	-0.24	1.86	-1.19	-0.22	3.90	-0.41	4.02	1.71	-1.17	-0.98	0.01	
Range	0.35	7699	17.60	12881	0.04	9	10	24	37	21615	5	5	5119	288	0.24	16	157	41	0.27	128	1	41	
Minimum	0.22	19223	4.50	30680	0.17	25	15	46	30	33217	12	12	11302	692	0.38	41	554	5	0.79	106	9	68	
Maximum	0.57	26922	22.10	43561	0.21	34	25	70	67	54832	17	17	16421	980	0.61	57	711	46	1.06	234	10	109	
Percentiles	25	0.26	19956	8.00	35284	0.18	29	15	54	33	36047	14	14	12959	714	0.50	51	598	6	0.87	118	9	73
	50	0.27	20640	8.90	38964	0.19	31	18	60	39	43934	15	15	13268	820	0.52	53	621	14	0.92	170	10	84
	75	0.31	22368	10.70	40395	0.20	32	20	64	43	48659	16	16	13855	871	0.53	54	655	18	0.94	189	10	89

گفته می‌شود. مقادیر خارج از ردیف گاهی به دلیل وجود خطاهای تجربی از قبیل خطا در تجزیه شیمیایی نمونه‌ها ایجاد می‌شود و در مواردی نیز به دلیل ناهمگنی‌های موجود در جامعه داده‌های اکتشافی بروز می‌کند. به طوری که وجود مقادیر غلظت بسیار بالا و پایین در سری داده‌های ژئوشیمیایی، مقادیر خارج از ردیف مثبت و منفی را سبب می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت نمونه‌های ناهنجار، جامعه از ردیف خارج از ردیف را تشکیل می‌دهند. وجود مقادیر خارج از ردیف شکل تابع توزیع داده‌ها را از حالت نرمال خارج می‌کند و به سمت‌های مقادیر کرانه‌ای منحرف می‌سازد (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). وجود مقادیر خارج از رده می‌تواند دلالت بر رخداد پدیده‌های زمین‌شناسی خاصی مثل کانه‌زایی یا غنی‌شدگی باشد. از آن جایی که اساس جداسازی ناهنجاری‌ها و تخمین ذخیره در اکتشافات ژئوشیمیایی بر فرض نرمال بودن داده‌ها استوار است و داده‌های ژئوشیمیایی به طور طبیعی ماهیت لاغرنمال دارند، از این‌رو توصیه می‌شود، نمونه‌های دارای مقادیر خارج از ردیف شناسایی شده و به وسیله مقادیر مناسب جایگزین

عنصر مس (Cu): مقادیر غلظت مس در نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای گستره چاه رستم از کمینه ۳۰ گرم در تن تا بیشینه ۶۷ گرم در تن تغییر می‌کند و مقدار متوسط آن ۴۰ گرم در تن است. در پارامترهای آماری توزیع عنصر مس در گستره چاه رستم مقادیر چولگی و کشیدگی توزیع به ترتیب ۱/۳۴ و ۱/۳۰ است. بیان از توزیع غیرمتقارن (لاگرنمال) با تمایل کمی به سمت راست (چولگی مثبت) می‌باشد (جدول ۱). وجود نمونه‌های عیار بالا و با فراوانی اندک مس در جامعه آماری عامل چولگی توزیع به سمت راست می‌باشد. نمودارهای ستونی فراوانی و احتمال عنصر مس نیز همانند داده‌های جدول پارامترهای آماری (جدول ۱)، شکل نامتقارن توزیع و تمایل آن به سمت راست را نشان می‌دهد (شکل ۵-پ، ت). در گستره چاه رستم، میانگین مس در جامعه رسوب آبراهه‌ای (۴۰ گرم در تن) نزدیک به متوسط فراوانی پوسته‌ای آن (۵۰ گرم در تن) است.

**شناسایی مقادیر خارج از ردیف و جایگزینی آن‌ها**  
در مباحث آماری به مقادیری که به طور معنی داری نسبت به سایر مقادیر اختلاف دارند، مقادیر خارج از ردیف



شکل ۵. (الف) نمودار ستونی فراوانی نقره، (ب) نمودار احتمال فراوانی مس، (ج) نمودار احتمال فراوانی مس. این نمودارها بر پایه داده‌های خام ژئوشیمی رسو بآبراهه‌ای رسم شده‌اند و نبود تقارن توزیع‌ها و تمایل آن‌ها به سمت راست آن مشخص است.

۰/۵۷ محاسبه می‌شود. بدین ترتیب مقدار میانگین (X) برابر با ۰/۲۸ و مقدار انحراف معیار (S) برابر با ۰/۰۳۸ می‌باشد. برای تعداد ۳۶ نمونه رسو بآبراهه‌ای بر اساس روش دورفل مقدار پارامتر g نیز برابر چهار می‌باشد. اگر بر اساس رابطه (۱) مقدار  $XA$  یعنی ۰/۵۷ بزرگ‌تر و یا مساوی مقدار عبارت  $X + (S \times g)$  باشد، مقدار ۰/۵۷ خارج از ردیف است و باید با حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف جایگزین شود.

$$XA \geq X + (S \times g) = 0.28 + (0.038 \times 4) = 0.57 \geq 0.43 \quad (1)$$

با توجه به اینکه مقدار ۰/۵۷ بزرگ‌تر از مقدار ۰/۴۳ است، پس نتیجه می‌شود که ۰/۵۷ مقدار خارج از ردیف است و باید جایگزین شود. در ادامه، مقدار ۰/۳۶ در نمونه‌های S-31 و S-32 بیشترین مقدار هستند. در این مرحله میانگین و

شوند. روش‌های مختلفی برای شناسایی و جایگزینی مقادیر خارج از ردیف وجود دارد و در این تحقیق از روش دورفل استفاده شده است. در روش دورفل حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف برای عنصر مورد نظر محاسبه می‌شود و غلظت عنصر در نمونه‌های خارج از ردیف به وسیله حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف جایگزین می‌شود (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). به عنوان مثال در این پژوهش برای شناسایی نمونه‌های دارای مقادیر خارج از ردیف عنصر نقره، نخست داده‌های ژئوشیمیابی نقره به صورت صعودی مرتب شده است. مقدار ۰/۵۷ گرم در تن در نمونه رسو بآبراهه‌ای شماره S-39 بیشترین مقدار برای عنصر نقره است. برای اثبات اینکه مقدار ۰/۵۷ یک مقدار خارج از ردیف است، میانگین و انحراف معیار جامعه نقره بدون در نظر گرفتن

(X+S<sub>x</sub>g) یعنی ۰/۴۱ است پس مقدار ۳۶/۰ برای عنصر نقره در نمونه‌های S-31 و S-32 خارج از ردیف نبوده و نیاز به جایگزینی ندارد. بنابراین حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف برای عنصر نقره در این جامعه مقدار ۴۳/۰ است و مقدار ۰/۵۷ در نمونه ۳۹-S با مقدار ۴۳/۰ جایگزین شده است. در این پژوهش، مقادیر خارج از ردیف همانند عنصر نقره برای سایر عناصر با استفاده از روش دورفل شناسایی شده، جایگزین شده است و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است که عناصر کلسیم، کادمیم، سریم، کروم، کبالت، آهن، لانتانیم، لیتیم، منگنز، نیکل، فسفر، وانادیم، ایتریم و روی بر اساس روش دورفل قادر مقادیر خارج از ردیف تشخیص داده شده‌اند.

انحراف معیار جامعه نقره بدون در نظر گرفتن مقادیر ۰/۵۷ و ۰/۳۶ محاسبه می‌شود. بدین ترتیب مقادیر میانگین (X) برابر با ۰/۲۷۶ و انحراف معیار (S) برابر با ۰/۰۳۴ می‌باشد. برای تعداد ۳۶ نمونه رسوبراههای بر اساس روش دورفل مقدار پارامتر  $\sigma$  نیز برابر چهار می‌باشد. اگر بر اساس رابطه (۲) مقدار XA یعنی ۰/۳۶ بزرگ‌تر و یا مساوی مقدار عبارت (X+S<sub>x</sub>g) باشد، مقدار ۳۶/۰ خارج از ردیف است و باید با حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف جایگزین شود.

$$XA \geq X + (S \times g) = 0.36 \geq 0.276 + (0.034 \times 4) = 0.36 \geq 0.41 \quad (2)$$

از آن جایی که مقدار ۳۶/۰ کوچک‌تر از مقدار

جدول ۲. نمونه‌های دارای مقادیر خارج از ردیف در برخی از عناصر و مقادیر جایگزینی آن‌ها به روش دورفل

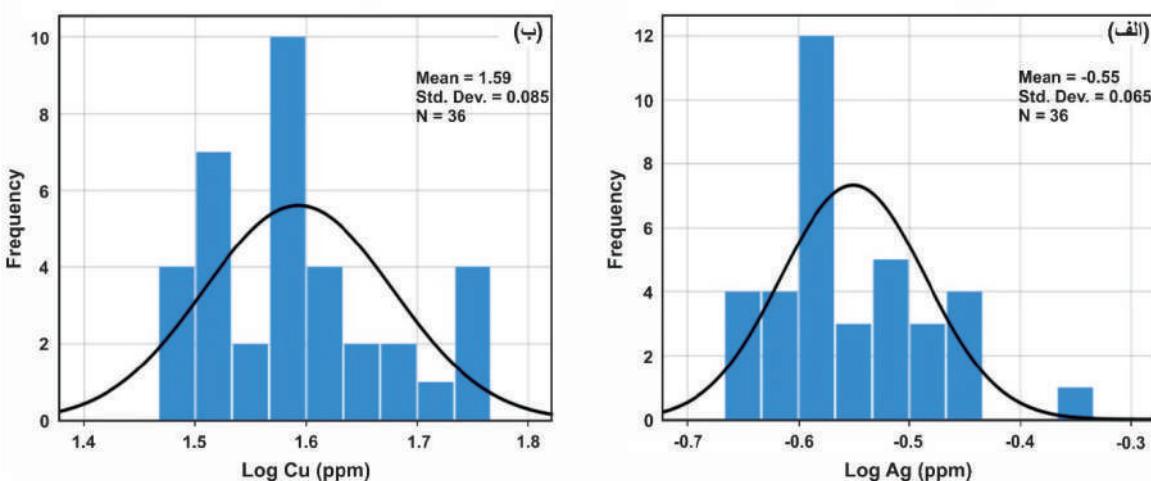
عنصر	شماره نمونه‌های رسوبراههای (مقدار خارج از ردیف بر حسب ppm)	مقدار جایگزین
Ag	S-39 (0.57 ppm)	۰/۴۳
Al	S-46 (26922 ppm), S-47 (26316 ppm)	۲۴۵۵۰
As	S-08 (22.10 ppm), S-06 (6.90 ppm)	۱۷/۵
Cu	S-20 (67 ppm), S-8 (63 ppm)	۵۸
Mg	S-47 (16421 ppm), S-52 (15738 ppm), S-46 (15676 ppm), S-39 (15074 ppm)	۱۴۵۰۰
Mo	S-08 (0.61 ppm)	۰/۵۷
Pb	S-08 (46 ppm)	۳۰
Sb	S-49 (1.06 ppm), S-39 (1.03 ppm)	۰/۹۸

## نرمال‌سازی داده‌های ژئوشیمیابی رسوبراههای با روش تبدیل لگاریتمی

بهینه غیرممکن شود. از آن جایی که بیشتر روش‌های آماری مورد استفاده در اکتشافات ژئوشیمیابی ناحیه‌ای (مرحله شناسایی و ثبت ناهنجاری‌های ژئوشیمیابی مرتبط با کانه‌زایی) و محلی (تعیین شکل، ابعاد و ارزیابی ذخیره کانسنگ) فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها را به همراه دارند، از این‌رو این مقادیر غیرعادی عیار بالا به عنوان مقادیر خارج از ردیف شناسایی شده و تصحیح می‌شوند. اگر با شناسایی و تصحیح مقادیر خارج از ردیف توزیع داده‌ها نرمال نشود، در این شرایط می‌توان با استفاده از توابع تبدیل مختلف از قبیل تبدیل لگاریتمی طبیعی، نمودار احتمال لگاریتمی، بیشتر جوامع آماری که در پژوهش‌های اکتشافی با آن‌ها سروکار داریم، غیرنرمال هستند و دارای چولگی مشتبه می‌باشند. این قبیل جوامع دارای مقادیر عیار بالا در کرانه سمت راست توزیع هستند و به جامعه زمینه یا جامعه با عیار میانگین کانسارت اضافه شده‌اند. این مقادیر غیرعادی بالا در واقع ناهنجاری‌ها (در اکتشافات ناحیه‌ای) و یا پیکرهای کانسنگ پر عیار (در اکتشافات عمومی و تفصیلی) را شامل می‌شوند. وجود مقادیر عیار بالا در بین داده‌ها سبب می‌شود تا از یک طرف نتایج غیرواقعی در مورد میانگین عیار جامعه به دست آید و از طرف دیگر برنامه‌ریزی اکتشافی و استخراجی

گام بعدی با استفاده از روش لگاریتمی، تمامی داده‌ها طوری تبدیل یافته‌اند، که مقادیر تبدیل یافته آن‌ها به توزیع نرمال و مقادیر چولگی و کشیدگی آن‌ها به ترتیب به اعداد صفر و سه نزدیک شود. به عنوان مثال نمودارهای ستونی فراوانی عناصر نقره و مس بر پایه داده‌های تبدیل یافته به روش لگاریتمی در شکل (۶-الف، ب) آورده شده است. به طوری که از این شکل‌ها مشخص است با شناسایی و تصحیح مقادیر خارج از ردیف و تبدیل لگاریتمی، شکل تابع توزیع عناصر نقره و مس به حالت نرمال نزدیک شده است.

نمودار فینی، تبدیل لگاریتمی سه پارامتری و تبدیل کاکس و باکس، داده‌ها را طوری تبدیل کرد که مقادیر تبدیل یافته آن‌ها دارای توزیع نرمال باشد (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). از خصوصیات یک توزیع نرمال می‌توان چولگی صفر، کشیدگی در حد سه، انطباق سه آماره میانگین، میانه و مد، شکل زنگوله‌ای منحنی توزیع و ... را نام برد. در این پژوهش برای نرمال‌سازی داده‌ها و نزدیک کردن شکل توزیع به حالت نرمال، در گام نخست مقادیر خارج از ردیف شناسایی شده و به وسیله مقادیر مناسب جایگزین شده‌اند (جدول ۲). در



شکل ۶. الف) نمودار ستونی فراوانی نقره، ب) نمودار ستونی فراوانی مس بر پایه داده‌های ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای تبدیل یافته به روش لگاریتمی که به حالت نرمال و متقاضی نزدیک شده‌اند

## تحلیل عاملی

عناصر است. در حقیقت، هدف از تحلیل عاملی تشخیص متغیرهای کنترل کننده اصلی از متغیرهای کم‌همیت است، به‌طوری که با حداقل تعداد متغیرهای عاملی، بیشترین تغییرپذیری بین داده‌ها را توجیه کرد و سهم نسبی هر یک از متغیرهای عاملی را در توجیه تغییرپذیری مشخص کرد. به تجربه ثابت شده است که تحلیل عاملی، روش مناسبی برای کاهش داده‌ها در اکتشافات ژئوشیمیایی است.

در گستره اکتشافی چاه رستم، تحلیل عاملی بر روی ۲۲ عنصر در ۳۶ نمونه رسوب آبراهه‌ای و براساس داده‌های تبدیل یافته به روش لگاریتمی انجام شده است. در روش عاملی برای ارزیابی درجه اعتبار تحلیل چندمتغیره از آزمون KMO و بارتلت استفاده می‌شود. هر چقدر مقدار

تحلیل عاملی یک روش آماری چندمتغیره برای بررسی و مطالعه همزمان تغییرات متغیرهای مورد بررسی در یک جامعه آماری، انعکاس نحوه تغییرات آن‌ها و روشی برای کاهش تعداد متغیرها است. تحلیل عاملی شامل محاسبه ضرایب همبستگی بین متغیرها، تعیین تعداد عامل‌ها و روش محاسبه آن‌ها، دوران عامل‌ها و اعمال تبدیلاتی خاص بر روی آن‌ها است. مهم‌ترین مسئله در تحلیل عاملی، اصل بیان همبستگی بین مقادیر غلظت عناصر به منظور نمایش الگوی تغییرات همزمان آن‌ها در یک مکان است. هدف‌های اساسی در انجام تحلیل عاملی شامل: الف) محاسبه تمامی عامل‌ها و شناسایی عامل‌های معتبر و ب) تعیین سهم نسبی هر یک از عامل‌ها در به وجود آمدن تغییرات توزیع

بر اساس نتایج تحلیل عاملی، تعداد شش عامل اول، حدود ۸۶ درصد از فراوانی تجمعی جامعه را پوشش می‌دهند و جزء عامل‌های معتبر محسوب می‌شوند. داده‌های جدول ۳ دلالت برآن دارد که مولفه اول قادر است حدود ۴۳/۴۰ درصد از کل تغییرپذیری را توجیه کند. این مقدار برای مولفه دوم افت دارد و به حدود ۱۸/۶۱ درصد رسیده است. مولفه‌های سوم، چهارم، پنجم و ششم به ترتیب در بردارنده هستند. در مجموع، شش عامل اول توانسته است در حدود ۸۶ درصد فراوانی جامعه را پوشش دهنده.

به عدد یک نزدیک باشد بیانگر درجه بالای اهمیت تحلیل فاکتوری است. در بررسی حاضر مقدار KMO برابر با ۰/۷۰ محاسبه شده است که اعتبار تجزیه عاملی انجام شده را در حد خوب نشان می‌دهد. در ضمن، در تحلیل عاملی برای اعتبارسنجی، درصد مشارکت هر یک از متغیرها نیز محاسبه می‌شود. اگر میزان درصد مشارکت متغیرها به عدد یک نزدیک‌تر باشد درجه اعتبار کار چندمتغیره بیشتر خواهد بود. در این پژوهش، درصد مشارکت برای بسیاری از عناصر بیش از ۸۰٪ است و برای عناصر نقره، کادمیم و آنتیموان در حدود ۶۰٪ است و بیان از درجه اعتبار بالای تحلیل فاکتوری است.

جدول ۳. محاسبه درصد پراش و درصد تجمعی پراش هر یک از عناصر در تحلیل عاملی داده‌های ژئوشیمی رسوبراهه‌ای

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	9.55	43.39	43.39	9.55	43.39	43.39	8.31	37.78	37.78
2	4.09	18.61	62.00	4.09	18.61	62.00	4.26	19.35	57.13
3	1.50	6.82	68.82	1.50	6.82	68.82	2.04	9.28	66.41
4	1.41	6.40	75.22	1.41	6.40	75.22	1.55	7.04	73.44
5	1.28	5.83	81.05	1.28	5.83	81.05	1.53	6.94	80.39
6	1.01	4.58	85.63	1.01	4.58	85.63	1.15	5.24	85.63
7	0.69	3.13	88.76						
8	0.55	2.49	91.25						
9	0.51	2.30	93.56						
10	0.38	1.73	95.28						
11	0.25	1.14	96.43						
12	0.22	0.99	97.41						
13	0.19	0.87	98.28						
14	0.11	0.50	98.78						
15	0.10	0.44	99.22						
16	0.08	0.35	99.57						
17	0.04	0.17	99.74						
18	0.03	0.12	99.86						
19	0.02	0.08	99.94						
20	0.01	0.04	99.98						
21	0.00	0.02	99.99						
22	0.001	0.007	100						

دوران عامل‌ها در جدول ۴ آورده شده است. در ماتریس مولفه‌های چرخش یافته، مقادیر بیشتر از ۵۰٪ به عنوان غنی‌شدنی عنصر و مقادیر کمتر از ۵٪- بیانگر فقیرشدنی عنصر در هر عامل می‌باشد. از این‌رو در جدول ماتریس مولفه‌های چرخش یافته برای هر یک از عامل‌های شش‌گانه عناصر غنی‌شده مشخص شده است (جدول ۴).

در تحلیل‌های آماری چندمتغیره به روش عاملی، دوران عامل‌ها به دو روش عمود و مایل صورت می‌گیرد. دوران‌های عمودی استقلال میان عامل‌ها را حفظ می‌کنند، در حالی که دوران‌های مایل، عامل‌ها را به هم وابسته می‌سازند. در این پردازش آماری با استفاده از روش وریمکس (دوران متعامد) بر روی ضرایب عاملی دوران صورت گرفت. مقادیر ماتریس شش مولفه معتبر برای ۲۲ عنصر، قبل و بعد از

جدول ۴. ماتریس مقادیر مولفه‌ها برای تعداد شش عامل قبل و بعد از دوران عامل‌ها به روش وریمکس

Element	Component Matrix						Element	Rotated Component Matrix					
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6		Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
Ag	0.62	0.31	-0.19	-0.32	0.01	0.07	Ag	<b>0.64</b>	-0.06	0.02	-0.45	-0.01	0.10
Al	-0.11	0.84	0.23	-0.28	0.26	0.13	Al	0.27	-0.68	<b>-0.45</b>	-0.10	<b>0.50</b>	-0.06
As	0.57	-0.15	0.15	0.20	-0.63	0.11	As	0.32	0.16	<b>0.82</b>	-0.01	0.08	0.06
Ca	-0.83	0.10	-0.17	0.02	0.28	0.09	Ca	-0.67	-0.29	<b>-0.51</b>	0.08	-0.02	0.12
Cd	0.42	0.24	-0.24	0.51	-0.20	0.19	Cd	0.35	-0.28	<b>0.42</b>	0.13	-0.31	<b>0.36</b>
Ce	0.20	-0.85	0.21	-0.10	0.31	0.04	Ce	0.02	<b>0.93</b>	-0.13	0.22	0.05	0.02
Co	0.92	0.32	0.07	0.03	-0.05	0.03	Co	0.92	-0.06	0.28	-0.09	-0.02	0.05
Cr	0.84	0.20	0.19	0.22	0.33	-0.06	Cr	0.92	0.05	0.01	0.26	-0.12	0.01
Cu	0.69	-0.32	0.07	-0.37	-0.24	0.18	Cu	0.48	0.53	<b>0.34</b>	-0.36	0.21	0.10
Fe	0.96	0.19	-0.08	0.00	0.08	-0.06	Fe	0.94	0.08	0.18	-0.14	-0.19	0.05
La	0.35	-0.85	0.15	-0.09	0.17	0.05	La	0.11	<b>0.94</b>	0.05	0.13	0.01	0.05
Li	-0.44	0.10	0.68	-0.24	-0.27	0.36	Li	-0.33	-0.14	0.07	0.13	<b>0.88</b>	-0.06
Mg	-0.30	0.80	0.35	-0.05	-0.13	0.10	Mg	0.01	-0.80	-0.07	0.04	<b>0.50</b>	-0.13
Mn	0.96	0.15	0.00	0.09	-0.02	-0.02	Mn	<b>0.91</b>	0.10	<b>0.31</b>	-0.05	-0.14	0.06
Mo	0.19	-0.23	-0.35	0.18	0.14	0.78	Mo	0.06	0.21	0.02	0.02	-0.06	<b>0.90</b>
Ni	-0.12	-0.21	0.55	0.68	0.24	0.11	Ni	-0.05	0.09	0.04	<b>0.93</b>	0.10	0.05
P	0.56	-0.69	0.01	-0.30	-0.10	0.04	P	0.28	<b>0.84</b>	0.24	-0.23	0.02	0.03
Pb	0.81	-0.11	0.22	0.13	-0.17	-0.25	Pb	0.69	0.28	<b>0.45</b>	0.10	-0.10	-0.23
Sb	0.58	0.35	-0.15	-0.13	0.08	0.23	Sb	0.64	-0.14	0.01	-0.26	0.01	<b>0.27</b>
V	0.94	0.22	-0.10	0.04	0.14	-0.10	V	0.94	0.05	0.13	-0.10	-0.24	0.03
Y	0.71	0.10	0.28	-0.20	0.40	0.07	Y	0.82	0.22	-0.21	0.03	0.18	0.01
Zn	0.95	0.18	0.06	0.03	0.04	0.00	Zn	0.93	0.09	<b>0.30</b>	-0.05	-0.07	0.05

سنگ‌زایی مرتبط است.

**عامل سه:** در عامل سه عناصر مس، روی، سرب، نقره، آرسنیک، آنتیموان، کادمیم و مولبیدن غنی‌شدگی دارند. در ژئوشیمی اکتشافی از آن‌ها به عنوان عناصر معرف و ردیاب بُرخی از کانه‌زایی‌ها یاد می‌شود. از مجموعه این عناصر به عنوان ردیاب ژئوشیمیایی برای پی‌جوبی و اکتشاف کانسارهای با منشاء ماگمایی-گرمایی و گرمایی از قبیل کانسارهای پورفیری، اسکارن‌ها، رگهای چندفلزی گرمایی و رگهای ابی‌ترمال استفاده می‌شود (حسین زاده و همکاران، ۱۴۰۲؛ غیاثی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳). بنابراین همیافتی ژئوشیمیایی عناصر در عامل سه با فرآیندهای کانه‌زایی ماگمایی-گرمایی در این گستره ارتباط دارد.

**عامل چهار:** در عامل چهار عنصر نیکل و تا حدودی کروم غنی‌شدگی دارد و به احتمال از سنگ‌های آتشفشنی با ترکیب آندزیت تا آندزیت بازالت تاثیر می‌پذیرند و با فرآیند سنگ‌زایی مرتبط است. عناصر کانسارساز از قبیل نقره، مس، روی و آنتیموان در این عامل فقیر‌شدگی دارند و از نظر کانه‌زایی مهم نیست.

**عامل پنج:** این عامل شامل عناصر آلومینیم، منیزیم و لیتیم است. همیافتی ژئوشیمیایی این عناصر از سنگ‌های آتشفشنی با ترکیب آندزیت و داسیت و سنگ‌های نفوذی تا نیمه‌نفوذی با ترکیب مونزودیوریت، گرانودیوریت و کوارتز دیوریت در گستره چهار رستم تاثیر پذیرفت و با فرآیندهای

در ادامه دلایل همیافتی ژئوشیمیایی و غنی‌شدگی عناصر در هر یک از عامل‌ها به طور جداگانه توصیف می‌شود: **عامل یک:** در عامل یک عناصر آهن، منگنز، کروم، کبات، وانادیم، نیکل و ایتریم غنی‌شدگی دارند. همیافتی ژئوشیمیایی این عناصر از سنگ‌های آتشفشنی با ترکیب آندزیت، آندزیت بازالت و بازالت و سنگ‌های نفوذی تا نیمه‌نفوذی با ترکیب مونزودیوریت، گرانودیوریت و دیوریت در گستره چهار رستم تاثیر پذیرفته است و با فرآیندهای سنگ‌زایی مرتبط است. از آن جایی که عناصر کانسارساز از قبیل مس، روی، سرب، نقره، آرسنیک، آنتیموان، کادمیم و مولبیدن نیز در عامل یک غنی‌شدگی دارند، بنابراین این احتمال وجود دارد، بخشی از بودجه عناصر کانسارساز در سامانه‌های ماگمایی-گرمایی ناحیه چاه رستم از شستشوی گرمایی سنگ‌های آتشفشنی با ترکیب آندزیت، آندزیت بازالت و بازالت تامین می‌شود.

**عامل دو:** این عامل شامل عناصر سریم، لانتانیم، فسفر و ایتریم است. همیافتی ژئوشیمیایی این عناصر از سنگ‌های آتشفشنی با ترکیب آندزیت و داسیت و سنگ‌های نفوذی تا نیمه‌نفوذی با ترکیب مونزودیوریت، گرانودیوریت و کوارتز دیوریت در گستره چاه رستم تاثیر پذیرفت و با فرآیندهای

نهایت مقدار انتشار عنصر مورد نظر در محیط ناهنجاری با مقدار زمینه محلی و جهانی آن تعیین کننده می‌باشد. در اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک، توزیع فضایی مقادیر غلظت عناصر به صورت نقشه رسم می‌شود. در گستره اکتشافی چاه رستم پس از پردازش داده‌های ژئوشیمیایی رسواب آبراهه‌ای، مقادیر حد زمینه، حد آستانه‌ای و حد آنومالی برای عناصر مختلف و عامل‌ها (تحلیل چندمتغیره) محاسبه شده است و در گام بعدی نقشه‌های ناهنجاری ژئوشیمیایی در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.6 رسم شده است. در تهیه نقشه‌ها، تعداد نمونه‌ها، توزیع فضایی نمونه‌ها، روش تخمین و ابعاد شبکه تخمین از اهمیت به سزاپی برخوردار می‌باشد. در این پژوهش، برای تعیین حدود ناهنجاری‌ها برای رسم نقشه‌ها از روش کلاسیک  $Md+nS$  استفاده شده است و مقادیر  $Md+1S$ ,  $Md+2S$ ,  $Md+3S$  و  $Md+4S$  به ترتیب برابر با حدود زمینه، آستانه‌ای و آنومالی در نظر می‌گیرند (جدول ۵). در ترسیم نقشه‌های ناهنجاری عناصر و عامل‌ها مقادیر بزرگ‌تر از مقدار  $Md+3S$  به عنوان ناهنجاری درجه یک (رنگ قرمز)، مقادیر  $Md+2S$  تا  $Md+3S$  به عنوان ناهنجاری درجه دو (رنگ زرد)، مقادیر  $Md+2S$  تا  $Md+1S$  به عنوان ناهنجاری درجه سه (رنگ سبز) و مقادیر کمتر از  $Md+1S$  به عنوان زمینه (رنگ آبی) انتخاب شده است. دلیل انتخاب آماره میانه برای جدایش ناهنجاری‌ها به این خاطر است که میانه در مقایسه با میانگین کمتر در اثر مقادیر کرانه‌ای (مقادیر غلظت بزرگ‌تر و کوچک‌تر) موجود در جامعه نمونه‌ها قرار می‌گیرد (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰).

جدول ۵. مقادیر حدود زمینه‌ای، آستانه‌ای و ناهنجاری برای ۱۲ عنصر مهم در گستره اکتشافی چاه رستم (مقادیر غلظت بر حسب گرم در تن)

Ranges	Ag	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Zn
$Md+1S$	0.31	12.03	20.56	65.95	46.86	51161	909	0.60	55.78	25.68	0.97	94.40
$Md+2S$	0.36	16.26	23.49	73.11	57.03	59577	1007	0.70	59.27	47.09	1.01	106.09
$Md+3S$	0.42	21.97	26.83	81.03	69.42	69378	1117	0.80	62.98	86.36	1.06	119.22

آهن، منگنز، مولیبدن، نیکل، سرب، آنتیموان و روی) و تعداد شش عامل رسم شده است. با این وجود، در این تحقیق به ارائه نقشه‌های ژئوشیمیایی عناصر مهم از قبیل

سنگ‌های آتشفسانی با ترکیب آندزیت، داسیت و آندزیت بازالت و سنگ‌های نفوذی تا نیمه‌نفوذی با ترکیب مونزودیوریت، گرانودیوریت و کوارتز دیوریت در گستره چاه رستم تاثیر گرفتند و با فرآیندهای سنگ‌زایی مرتبط هستند. عامل شش: در عامل شش عناصر مولیبدن، آنتیموان و کادمیم به مقدار جزئی غنی‌شدنی دارند و از رخداد کانه‌زایی ماقمایی-گرمایی ناحیه چاه رستم تاثیر گرفتند. بنابراین، عامل شش نیز مولفه کانه‌زایی است ولی در مقایسه با عامل سه از درجه اعتبار و اهمیت پایینی برخوردار است.

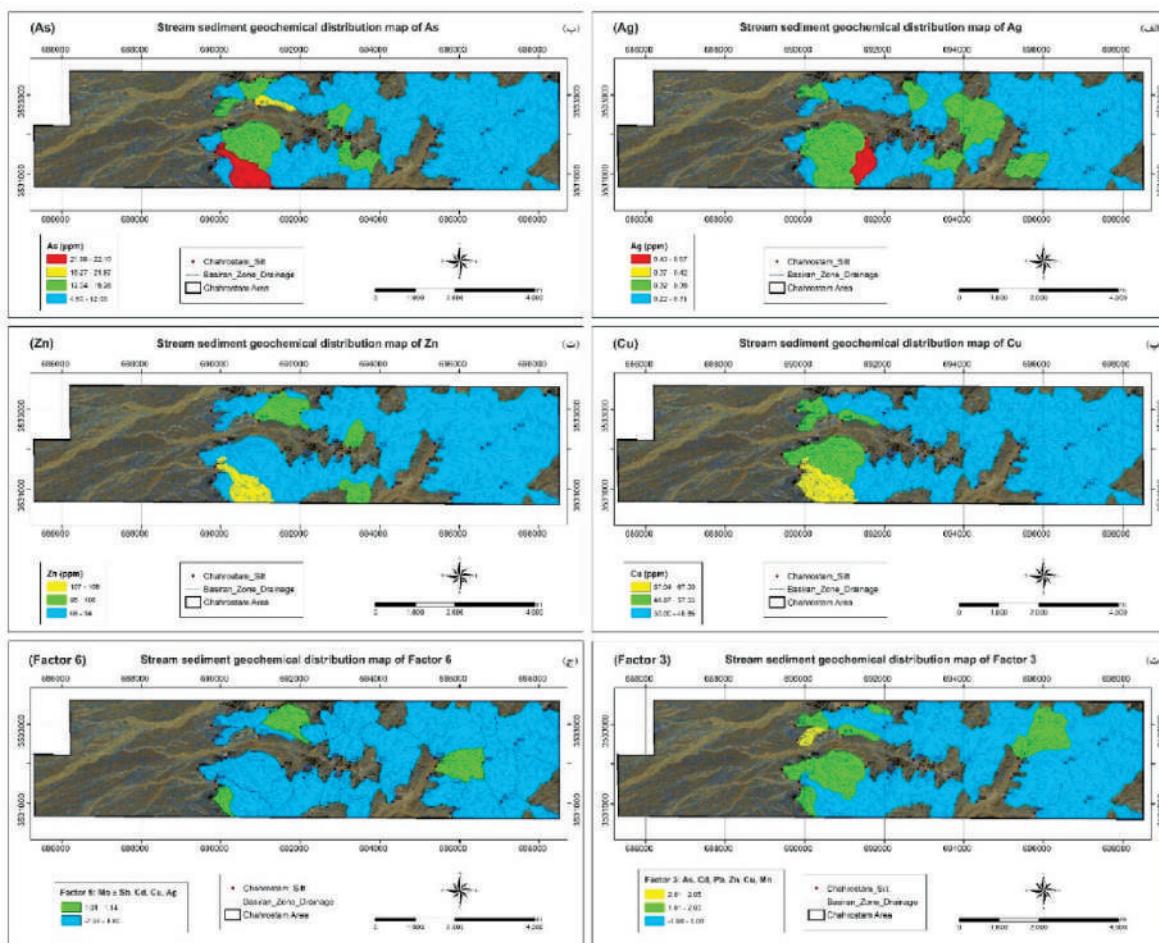
### رسم نقشه‌های ناهنجاری ژئوشیمیایی رسواب آبراهه‌ای و انتخاب مناطق امیدبخش

هدف پایانی اکتشافات ژئوشیمیایی رسواب آبراهه‌ای در یک منطقه، تهیه نقشه‌های ناهنجاری ژئوشیمیایی برای عناصر مختلف است و نقش ویژه و ارزندهای در تعیین مناطق امیدبخش معدنی دارند. در انتخاب و معرفی مناطق امیدبخش معدنی، عواملی از قبیل طراحی مناسب موقعیت نمونه‌ها، نمونه‌برداری دقیق، آماده‌سازی و روش تجزیه مفید با حد خطای مجاز، داده‌پردازی و روش‌های مناسب رسم نقشه‌ها بسیار بالاهمیت هستند. به طور کلی در تعریف یک ناحیه ناهنجاری ژئوشیمیایی پارامترهایی همچون تعداد نمونه‌های ناهنجار با انتشار ناهمگون از هر عنصر، روند گسترش ناهنجاری، وسعت ناهنجاری، محل دقیق نمونه‌های ناهنجاری، همپوشانی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی با یکدیگر و با ناهنجاری‌های ژئوفیزیک هوایی، ساختارهای تکتونیکی، گسترش رخسارهای سنگی محیط ناهنجار و در

در این مطالعه، بر پایه نتایج پردازش‌های آماری تک متغیره و چندمتغیره، نقشه‌های ناهنجاری ژئوشیمیایی برای تعداد ۱۲ عنصر (نقره، آرسنیک، کبالت، کروم، مس،

و حوضه‌های بالادست نمونه‌های رسوب آبراههای شماره‌های ۲۶، ۲۸، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۷ که دارای ناهنجاری‌های عناصر نقره، آرسنیک، آنتیموان، روی و فاکتور دو می‌باشند، به عنوان ناحیه امیدبخش معدنی شماره دو انتخاب شده است (شکل ۷). در ادامه، برای ارزیابی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراههای، در هر دو ناحیه امیدبخش به طور همزمان اکتشافات سنج ژئوشیمیایی سیستماتیک سطحی انجام شده است.

نقره، آرسنیک، مس، روی و عامل‌های سه و شش اکتفاء شده است (شکل ۷-الف-ج). از تلفیق نقشه‌های ناهنجاری ژئوشیمیایی تکعنصری و عاملی، محیط و حوضه‌های بالادست نمونه‌های رسوب آبراههای شماره‌های سه، هشت، ۱۰، شش، پنج، دو، نه و ۱۲ به عنوان نواحی امیدبخش معدنی یک معروفی شده است. در این نواحی، عناصر مس، آرسنیک، نقره، سرب، روی، منگنز، آهن و عامل سه دارای ناهنجاری‌های مرتبه یک تا سه هستند. علاوه بر این محیط

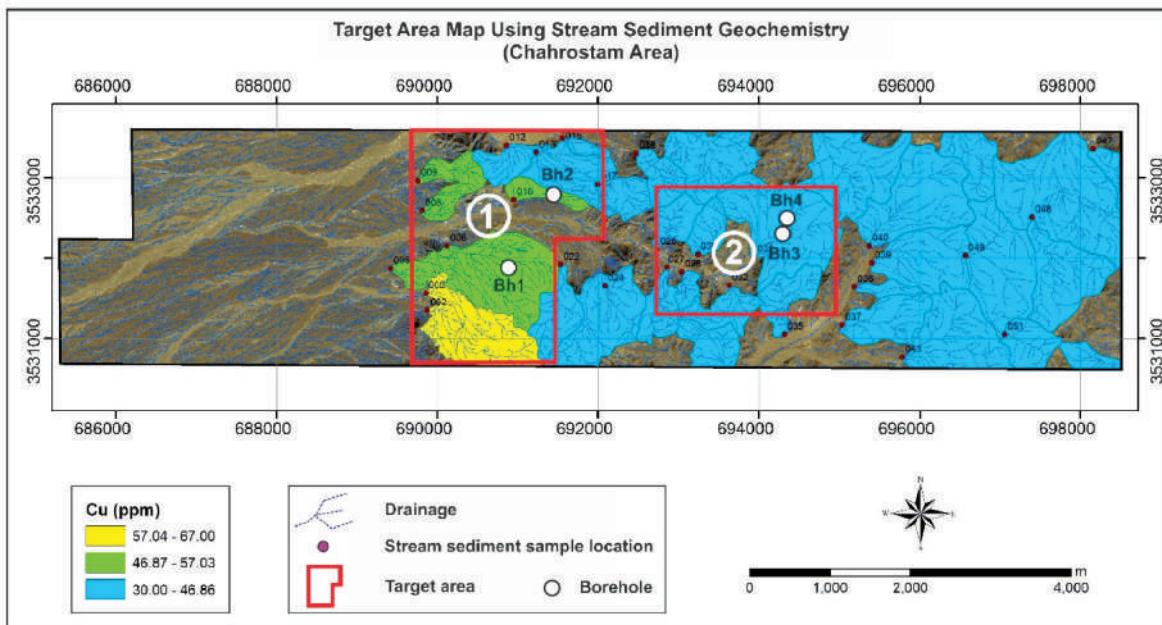


شکل ۷. نقشه‌های توزیع ژئوشیمیایی تکعنصری و چندعنصری مهم در بر پایه داده‌های رسوب آبراههای، (الف) نقره، (ب) آرسنیک، (پ) مس، (ت) روی، (ث) عامل سه و (ج) عامل شش

برای ادامه بررسی‌های اکتشافی معرفی شده است. در این دو ناحیه امیدبخش به طور همزمان اکتشافات سنج ژئوشیمیایی سیستماتیک سطحی انجام شده است. در مناطق ناهنجاری ژئوشیمیایی رسوب آبراههای، تعداد ۳۰ نمونه سنج ژئوشیمیایی

## اکتشافات سنج ژئوشیمیایی سیستماتیک سطحی

در گستره چاه رستم، بر اساس پردازش داده‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراههای دو ناحیه امیدبخش معدنی



شکل ۸. نقشه مناطق امیدبخش معدنی بر پایه پردازش داده‌های ژئوشیمیایی رسواب آبراهه‌ای

و عاملی، نواحی امیدبخش برای بررسی‌های زیرسطحی و حفر گمانه‌های اکتشافی آزمایشی انتخاب شده است (شکل ۹).

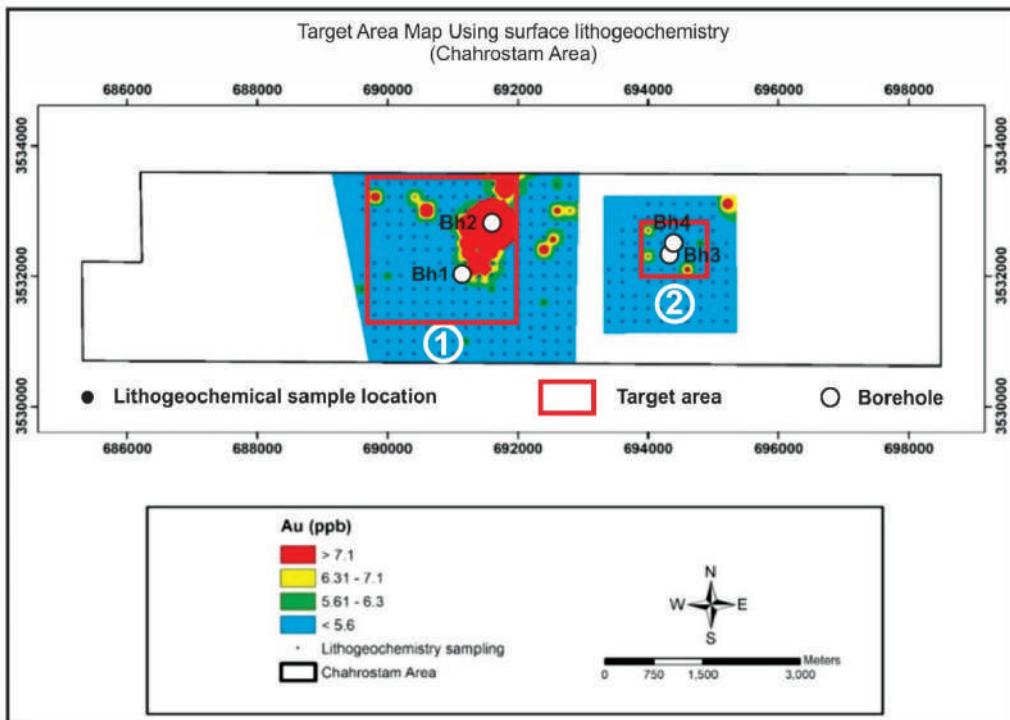
### حفر گمانه‌های اکتشافی برای ارزیابی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی رسواب آبراهه‌ای و سنگ ژئوشیمیایی

در گستره اکتشافی چاه رستم، گمانه‌های اکتشافی آزمایشی در مناطق امیدبخش شماره‌های یک و دو که بر اساس تلفیق یافته‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی رسواب آبراهه‌ای و سنگ ژئوشیمی سطحی معرفی شده‌اند، حفر شده است. در منطقه امیدبخش شماره یک، گمانه‌های شماره‌های BH1 و BH2 به ترتیب تا عمق ۲۷۲ و ۶۶ متر آزمیوت ۱۸۰ و ۳۰ درجه، و در منطقه امیدبخش شماره دو گمانه‌های شماره‌های BH3 و BH4 به ترتیب تا عمق ۴۶ و ۲۵۹ متر و آزمیوت ۱۳۵ و ۱۸۰ درجه حفر شده است (شکل‌های ۸ و ۹). در این تحقیق، از چهار گمانه اکتشافی، تعداد ۳۰ نمونه برای تهیه مقاطع نازک و نازک-صیقلی و تعداد ۲۴۹ نمونه برای تجزیه ژئوشیمیایی چندعنصری و طلا برداشت شده است. بر اساس مشاهدات مغزه‌های حفاری و مطالعات سنگنگاری و کانه‌نگاری نمونه‌های

به شکل مربعی و در ابعاد شبکه ۲۰۰ در ۲۰۰ متر طراحی شده است. نمونه‌برداری در هر سلول به روش لبپری (قطعه‌ای) هستند. در این روش تعداد ۴۰ تا ۵۰ قطعه کوچک سنگ به ابعاد تقریبی سه تا چهار سانتی‌متر و به وزن کلی حدود سه کیلوگرم از رخنمون واحدهای سنگی انتخاب شده است. تمامی نمونه‌های سنگ پس از خردایش و نرمایش در مخلوط چهار اسید (اسید نیتریک، اسید هیدروکلریک، اسید پرکلریک Ag, Al, As, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, La, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Sb, V, Y, Zn) با استفاده از روش‌های ICP-OES/MS تجزیه شیمیایی شده است. عنصر طلا نیز به طور جداگانه با استفاده از روش غال‌گذاری (F.A.) تجزیه شده است. مقادیر بیشنه غلظت عناصر مهم از قبیل مس، طلا، سرب، روی، مولیبدن، آرسنیک و گوگرد در نمونه‌های سنگ ژئوشیمیایی گستره چاه رستم، به ترتیب ۸۱۵، ۲۵۵، ۴۸۸، ۲۱۵، ۸، ۱۷۹ و ۲۴۰۸ گرم در تن اندازه‌گیری شده است و بیان از غنی‌شدگی قابل ملاحظه مس، طلا و سرب در برخی از نمونه‌های سنگ ژئوشیمیایی دارد. در نهایت، بر پایه پردازش‌های آماری تکمتغیره و چندمتغیره داده‌های سنگ ژئوشیمیایی و ترسیم نقشه‌های ناهنجاری تکعنصری

از کانی‌های سازنده‌ی آندزیت و آندزیت-بازالت‌ها هستند. این سنگ‌ها دارای مگنتیت و پیریت به صورت دانه‌پراکنده می‌باشند. بلورهای درشت پلازیوکلаз و هورنبلند در زمینه‌ای از ریزبلورهای پلازیوکلاز قرار گرفته‌اند (شکل ۱۰-الف، ب).

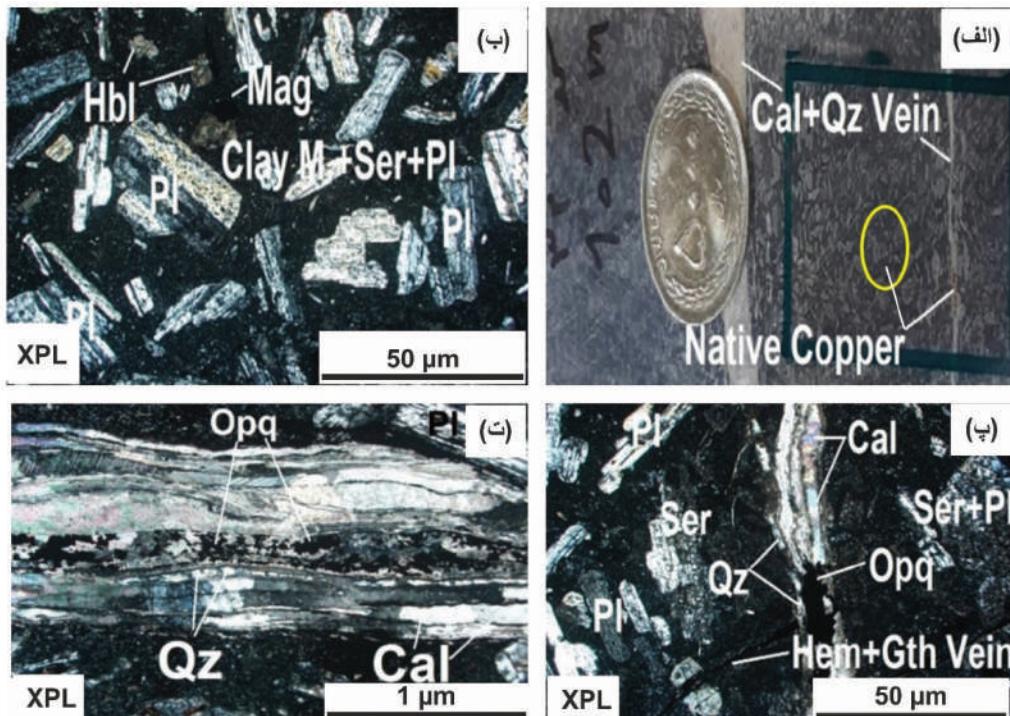
مغزه‌های حفاری، جنس سنگ‌ها بیشتر از نوع آندزیت تا آندزیت-بازالت است و دارای بافت‌های پورفیری با زمینه میکرولیتی، بادامکی و بندرت جریانی و مگاپورفیری می‌باشند. پلازیوکلاز، هورنبلند، پیروکسن و کانی‌های کدر



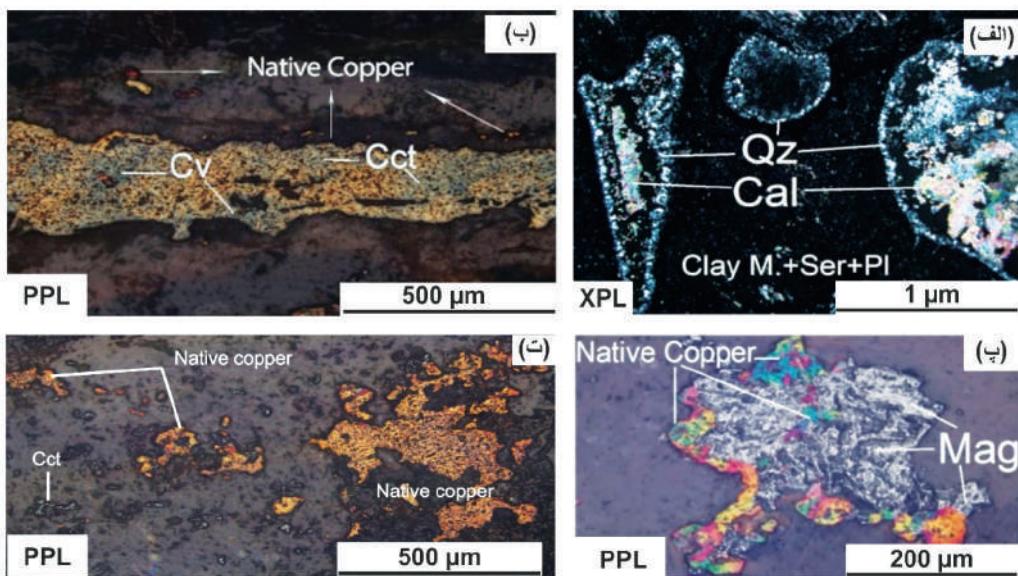
شکل ۹. نقشه مناطق امیدبخش معدنی بر پایه پردازش داده‌های سنگ‌ژئوشیمیایی سطحی

مشاهده می‌شود (شکل ۱۱-ت). مگنتیت‌ها شامل دو نسل هستند، مگنتیت‌های ریزبلور و پراکنده در متن سنگ به احتمال زیاد منشا ماقمایی دارند (شکل ۱۰-ب) و مگنتیت‌های درشت‌بلور (بیشتر به صورت پرکننده رگه‌رگچه‌ها) و هم‌رشدی با مس خالص، حاصل دگرسانی گرمابی دمای بالای کانی‌های آهن-منیزیم‌دار (از قبیل آمفیبول‌ها، پیروکسن‌ها و مگنتیت‌های اولیه) هستند (شکل ۱۰-ت، شکل ۱۱-پ). حفرات سنگ‌های آندزیتی و آندزیت-بازالتی نیز بیشتر با کلسیت، کوارتز و کلریت پر شده است و بافت بادامکی تشکیل داده‌اند (شکل ۱۱-الف). در گمانه‌های ۱ و ۲، آثاری از نفوذی‌های دیوریت در سنگ‌های آندزیتی و آندزیت-بازالتی مشاهده می‌شود. دیوریت‌ها با بافت دانه‌ای دارای کانه‌زایی کالکوپیریت و پیریت هستند.

کانی‌های دگرسانی شامل کلریت، سریسیت، کانی‌های رسی، کلسیت، کوارتز و اکسیدهای آهن هستند. آمفیبول‌ها به کلریت و اکسیدهای آهن دگرسانی نشان می‌دهند، پلازیوکلазها هم به طور خفیف سریسیتی شده‌اند و گاهی به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند (شکل ۱۰-ب، پ). سنگ‌های آندزیتی و آندزیت-بازالتی توسط رگه-رگچه‌های کلسیت، کوارتز و اکسیدهای آهن قطع شده است. مس خالص و بندرت کالکوپیریت همراه کلسیت، کوارتز و مگنتیت به صورت رگه-رگچه‌ای مشاهده می‌شوند (شکل ۱۰-پ، ت). کانه‌های مس خالص به طور ضعیف به کالکوسیت و کوولیت جانشینی دارند (شکل ۱۱-ب). رگه‌های کلسیتی-سیلیسی کانه‌دار به نوبه خود توسط رگه-رگچه‌های هماتیت و گوتیت قطع شده‌اند (شکل ۱۰-پ). مس خالص گاهی به صورت دانه‌پراکنده در فضاهای خالی موجود در متن سنگ نیز



شکل ۱۰. (الف) نمونه مغزه حفاری از آندزیت پورفیری که توسط رگه‌های کلسیتی-سیلیسی دارای مس خالص قطع شده است، (ب) تصویر میکروسکوپی از پلازیوکلاز، هورنبلند و مگنتیت در زمینه‌ای از ریزبلورهای پلازیوکلاز، کانی‌های رسی و سریسیت، (پ) تصویر میکروسکوپی از نمونه آندزیت پورفیری که به وسیله رگه‌های کلسیتی-سیلیسی کانه‌دار و رگه‌های هماتیتی-گوتیتی قطع شده است، (ت) تصاویر میکروسکوپی از رگه کلسیتی-سیلیسی کانه‌دار در سنگ میزان آندزیت بازالتی دگرسان شده. Cal: کلسیت، Clay M: کانی‌های رسی، Gth: گوتیت، Hem + Gth Vein: هماتیت، Mag: مگنتیت، Native Copper: کانی‌های تیره، Pl: پلازیوکلاز، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت (نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از Whitney and Evans, 2010)

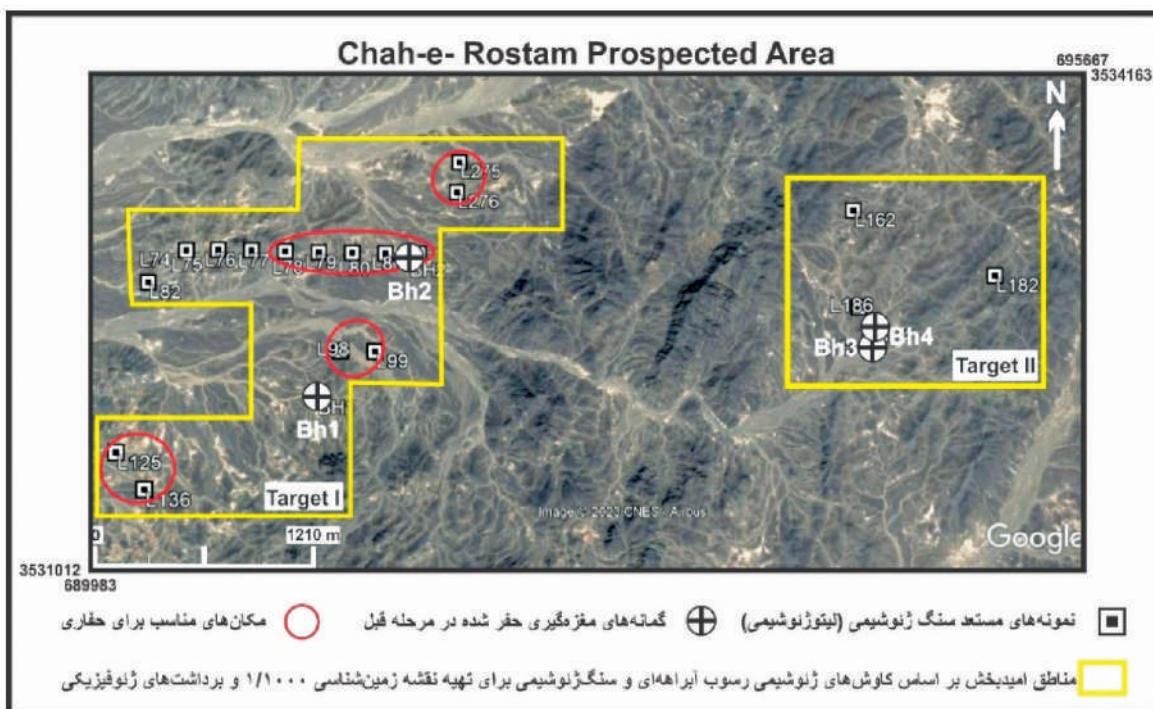


شکل ۱۱. (الف) تصویر میکروسکوپی از پرشدگی حفرات آندزیت پورفیری دگرسان شده به وسیله کلسیت، کوارتز، کلریت و اکسیدهای آهن، (ب) تصویر میکروسکوپی از رگه مس خالص که کانه مس خالص به طور خفیف به کالکوسیت و کولولیت جانشینی دارد، (پ) تصویر میکروسکوپی از همرشدی مس خالص و مگنتیت در داخل رگه‌های کلسیتی-سیلیسی، (ت) تصویری از مس خالص و کالکوسیت در فضاهای خالی سنگ‌های آندزیت بازالتی. Cal: کلسیت، Cct: کالکوسیت، Cv: کولولیت، Clay M.: کانی‌های رسی، Mag: مگنتیت، Native Copper: مس خالص، Pl: پلازیوکلاز، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت (نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از Whitney and Evans, 2010)

صحرایی، کانه‌زایی قابل توجهی از مس و عناصر همراه را در رخنمون‌های سنگی این ناحیه نشان نمی‌دهد. با این وجود، بررسی مغزه‌های حفاری وجود مس خالص و به مقدار کم کالکوپیریت را در رگه‌رگچه‌های کلسیتی-سیلیسی-اکسید آهنی تایید می‌کند. کانه‌های مس در سامانه‌های رگه‌ای و پرشدگی‌های حفرات سنگ‌ها به وسیله کلسیت، کوارتز، پیریت، مگنتیت و هماتیت همراهی می‌شود. سنگ میزبان سامانه‌های کانه‌زایی اغلب سنگ‌های گدازه‌ای-توفی با ترکیب آندزیت تا آندزیت بازالت پورفیری هستند. بر پایه یافته‌های زمین‌شناسی و ژئوشیمی اکتشافی، گستره چاه رستم مستعد کانه‌زایی مس ( $\pm$  طلا) و به احتمال زیاد از نوع اپیترمال است و تصمیم‌گیری درباره پتانسیل اقتصادی کانه‌زایی در این گستره، مستلزم تداوم عملیات اکتشافی است. فعالیت‌های زمین‌شناسی و اکتشافی در گام نخست برای ناحیه امیدبخش شماره یک توصیه می‌شود و در صورت کسب موفقیت اکتشافی در ناحیه یک، ادامه اکتشافات در ناحیه امیدبخش دو توجیه‌پذیر خواهد بود (شکل ۱۲).

## نتیجه‌گیری

تحلیل آماری داده‌های ژئوشیمی رسمی آبراهه‌ای، ناهنجاری‌های ژئوشیمیابی عناصر مس، روی، سرب، نقره، آرسنیک، کادمیم و مولیبدن را در این گستره ثبت شده است. از تلفیق نقشه‌های ژئوشیمیابی تکعنصری و چندعنصری (عاملی) رسمی آبراهه‌ای، دو ناحیه امیدبخش برای اکتشافات سنگ‌ژئوشیمی سیستماتیک سطحی معرفی شده است. تحلیل آماری داده‌های سنگ‌ژئوشیمیابی سطحی، ناهنجاری‌های عناصر مس، طلا، روی، سرب، مولیبدن، آرسنیک، آنتیموان و منگنز را در این گستره ثبت شده است. هم‌یافته ژئوشیمیابی عناصر مذکور بیان از رخداد احتمالی سامانه‌های کانه‌زایی اپیترمال در این ناحیه دارد. در این گستره دگرسانی‌های آرزبلی، کلربیتی، سیلیسی، کربناتی و اکسید آهنی وجود دارند. این دگرسانی‌ها در نتیجه تاثیر سیالات گرمابی مربوط به توده‌های نیمه‌نفوذی گرانودیوریتی، مونزودیوریتی و دیوریتی بر سنگ‌های آتشفسانی و آذرآواری ایجاد شده‌اند. مشاهدات



شکل ۱۲. مناطق امیدبخش بیشنهادی برای تداوم عملیات زمین‌شناسی و اکتشافی در گستره چاه رستم بر اساس تلفیق یافته‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی رسمی آبراهه‌ای، سنگ‌ژئوشیمیابی سطحی و حفاری‌های آزمایشی

## سپاسگزاری

- ۱/۱۰۰۰۰ کودگان. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، گزارش داخلی و منتشر نشده.
- سهندی، م.ر.، مجله، م.، سهیلی، م.، بیریان، م.، ۱۳۷۱. نقشه زمین‌شناسی چهارگوش دهسلم (چاوه‌ک)، سری ۱/۲۵۰۰۰، شماره K۹، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- غیاثی‌زاده، م.ک.، علی‌پوراصل، م. و مشکانی، س.ا.، ۱۴۰۳. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و الگوی تشکیل کانسار مس (طلا) کوه میل شمال خاور ساوه، استان مرکزی. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۸، ۵۰-۲۹.
- کریمپور، م.ح.، ملک‌زاده شفارودی، آ.، حیدریان، م.ر. و عسگری، ع.، ۱۳۸۶. کانی‌سازی، دگرسانی و ژئوشیمی منطقه اکتشافی طلا-قلع هیرد، استان خراسان جنوبی. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۱۵، ۱، ۶۷-۹.
- مدبری، س.، آذری‌فر، م.، احمدی، ث.ش. و رئیسی، د.، ۱۴۰۱. تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی‌ای، دگرسانی و دورسنجی به منظور معرفی پتانسیل‌های کانه‌زایی در منطقه سربیشه، خراسان جنوبی. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۶، ۶۲-۴۹.
- ملک‌زاده شفارودی، آ. و کریم‌پور، م.ح.، ۱۳۹۰. سن‌سنجی زیرکن به روش اورانیم-سرب در منطقه اکتشافی مس-طلا پورفیری ماهر آباد: شاهدی بر دوره متالوژنیک اونسن میانی ذخایر پورفیری در شرق ایران. مجله زمین‌شناسی اقتصادی، ۱، ۳-۴۱.
- یونسی، س.د.، حسین‌زاده، م.ر. و موید، م.، ۱۳۹۶. کانی‌شناسی کانسار (Pb-Bi-Ag) Zn-Cu-Mahor، باختر دهسلم: رهیافتی بر زنگ و نوع کانه‌زایی. فصلنامه علمی علوم زمین، ۲۷، ۱۰۵، ۳۰۸-۲۹۵.
- Javidi Moghaddam, M., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Santos, J.F. and Mendes, M.H., 2019. Geochemistry, Sr-Nd isotopes and zircon U-Pb geochronology of intrusive rocks: Constraint on the genesis of the Cheshmeh Khuri Cu mineralization and its link with granitoids in the Lut Block, Eastern Iran. Journal of Geochemical Exploration, 202, 59-76.

نگارندگان مقاله از دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شهرود که بستر و محیط مناسبی را برای انجام این پژوهش آماده کرده‌اند، سپاسگزاری می‌کنند. از مدیریت محترم مهندسین مشاور سامانه کانسار زمین، آقای دکتر موسوی ماکوئی، که با انجام این پژوهش در گستره اکتشافی چاه رستم موافقت کردند و زمینه تجزیه نمونه‌های ژئوشیمی‌ای رسواب آبراهه‌ای و سنگ‌ژئوشیمی‌ای را فراهم کردند، قدردانی می‌شود. از سردبیر و کارشناسان محترم مجله فصلنامه زمین‌شناسی ایران و داوران گرامی که مقاله حاضر را ارزیابی کرده‌اند، تشکر می‌شود.

## منابع

- ارجمندزاده، ر.، ۱۳۹۰. مطالعات کانی‌سازی، ژئوشیمی، سن‌سنجی و تعیین جایگاه تکتونوماگماتی تودهای نفوذی در انديس معدنی دهسلم و چاه‌شلغمی، بلوک لوت، شرق ایران. رساله دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، ۳۶۹.
- بلوریان، غ.ج.، ۱۳۸۷. نقشه و گزارش زمین‌شناسی کودکان، سری ۱/۱۰۰۰۰، شماره ۷۷۵۳، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- بهروزی، ا.، ناصر، خ.ن. و افتخار نژاد، ج.، ۱۳۷۱. نقشه و گزارش زمین‌شناسی بصیران، سری ۱/۱۰۰۰۰، شماره ۷۸۵۳، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- حسنی پاک، ع.ا. و شرف‌الدین، م.، ۱۳۸۰. تحلیل داده‌های اکتشافی. انتشارات دانشگاه تهران، ۹۷۱.
- حسین‌زاده، م.ر.، مغفوری، س.، موید، م.، هادوی چهاربیج، ز.، عامل، ن. و روانخواه، ع.ر.، ۱۴۰۲. زمین‌شناسی، ژئوشیمی و الگوی پراکندگی عنصر در زون‌های دگرسانی نقدوز-زاپیک، زون مگماتی ارساران. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۷، ۶۵، ۹۰-۷۱.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۹. اکتشافات ژئوشیمی‌ای سیستماتیک در ورقه ۱/۱۰۰۰۰ بصیران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، گزارش داخلی و منتشر نشده.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۸. اکتشافات ژئوشیمی‌ای سیستماتیک در ورقه

- Karimpour, M.H., Zaw, K. and Huston, D.L., 2005. S-C-O isotopes, fluid inclusion micro-thermometry, and the genesis of ore bearing fluids at Qaleh-Zari Fe-Oxide Cu-Au-Ag Mine, Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 16 (2), 153-168.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Stern, C.R., 2015. The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran: Geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies. *Ore Geology Reviews*, 65 (2), 522-544.
- Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H., 2015. Mineralogic, fluid inclusion, and sulfur isotope evidence for the genesis of Sechangi lead-zinc (-copper) deposit, Eastern Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 107, 1-14.
- Omidianfar, S., Monsef, I., Rahgoshay, M., Zheng, J. and Cousens, B., 2020. The middle Eocene high-K magmatism in Eastern Iran Magmatic Belt: constraints from U-Pb zircon geochronology and Sr-Nd isotopic ratios. *International Geology Review*, 62 (1), 1-18.
- Whitney, D.L. and Evans B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187.
- Yazdi, P., Kananian, A., Raeisi, D. and Modabberi, S., 2023. Geochemistry, petrogenesis and petrology of intrusive rocks in Shadan gold deposit, SW Birjand, Eastern Iran. *Geopersia*, 13 (1), 33-48.



# زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و مطالعه میانبارهای سیال در کانسار اکسید آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد، شمال شرق زنجان

داریوش عرب زوزنی<sup>۱</sup>، حسینعلی تاج‌الدین<sup>(۲)</sup>\* و مجید قادری<sup>۳</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲. استادیار، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳. استاد، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰

## چکیده

کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد در ۱۳ کیلومتری شمال شرق زنجان و در زیرپهنه طارم از پهنه البرز-آذربایجان قرار دارد. واحدهای سنتگی رخمنون یافته در گستره کانسار شامل یک توالی از سنگ‌های آتش‌شکانی ائوسن متشکل از توف و گدازه‌های با ترکیب حدواسط (آندریت تا تراکی آندزیت) می‌باشند و توسط توده‌های نفوذی نیمه عمیق مونزو-دیوریت-مونزوگابروی با سن ائوسن پایانی-الیگوسن قطع شده‌اند. توده‌های نفوذی میزبان کانسنگ‌های آهن-آپاتیت در کانسار غرب گلستان‌آباد دارای سرشت کالک‌آلکالن هستند و از نوع توده‌های متال‌الومین-پرآلومین و تیپ I می‌باشند و در محیط تکتونوماگماتی حاشیه فعال قاره‌ای تا پس از برخورد تشکیل شده‌اند. کانی‌سازی در کانسار غرب گلستان‌آباد به صورت کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت و با ساخت و بافت‌های رگه-رگچه‌ای، برشی، توده‌ای و دانه‌پراکنده در توده مونزو-دیوریت-مونزوگابروی رخ داده است. کانسنگ از کانی‌های فلزی مگنتیت، هماتیت، پیریت، کالکوپیریت، کالکوکسیت، کوولیت و ترکیبات هیدروکسیدی آهن و کانی‌های غیرفلزی آپاتیت، اکتینیولیت، ترمولیت، کوارتز، اپیدوت، کلریت و سریسیت تشکیل یافته است. دگرسانی‌های گرمایی همراه با کانسنگ‌های آهن-آپاتیت از انواع اکتینیولیتی شدن، سیلیسی شدن، سریسیتی شدن، پروپیلیتی شدن و سولفیدی شدن هستند. الگوهای فراوانی و تغییرات عناصر نادر خاکی در کانی‌های مگنتیت، آپاتیت و سنتگ میزبان کانی‌سازی به نسبت مشابه می‌باشد و یک ارتباط زایشی میان کانسنگ‌های آهن-آپاتیت با توده نفوذی مونزو-دیوریت-مونزوگابروی را نشان می‌دهند. مطالعه ریزدماسنجه بر روی میانبارهای دوفازی غنی از مایع بهدام افتاده در بلورهای آپاتیت، بیانگر دمای همگن‌شدنگی سیالات کانه‌ساز در بازه ۳۴۷ تا ۵۴۷ درجه سانتی‌گراد و شوری ۵/۸۶ تا ۲۱/۶۸ درصد وزنی معادل نمک طعام است. این کانسار از نظر ویژگی‌های زمین‌شناختی و کانی‌سازی، بیشترین شیاهت را با ذخایر تیپ اکسید آهن-آپاتیت (IOA) نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: زنجان، ژئوشیمی، غرب گلستان‌آباد، کانه‌زنی اکسید آهن-آپاتیت، میانبارهای سیال.

و تفاوت‌های قابل توجهی با یکدیگر دارند. فعالیت‌های اکتشافی در گستره کانسار غرب گلستان‌آباد، که در سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۶ توسط شرکت خدمات اکتشافی کشور انجام شده، شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی-معدنی با مقیاس‌های ۱:۵۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰، مطالعات ژئوفیریکی (مغناطیس‌سنگی)، حفر ترانشه، گمانه‌های مغزه‌گیری و آنالیز شیمیایی نمونه‌های کانسنسنگی می‌باشد. در پژوهش حاضر، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و میانبارهای سیال در کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد مورد مطالعه قرار گرفت و با توجه به ویژگی‌های مذکور، تیپ کانی‌سازی و چگونگی نهشت کانسنسنگ تعیین شده است. بدیهی است نتایج مطالعه این کانسار می‌تواند برای اکتشاف این تیپ از ذخایر، در بخش‌هایی از زیرپیهنه طارم که شرایط زمین‌شناسی مشابهی دارند، مورد استفاده قرار گیرد.

## روش مطالعه

این پژوهش شامل دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی است. مطالعات صحرایی، تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰، مطالعه پهنه‌های کانی‌سازی و ساخت و بافت کانسنسنگ‌ها را شامل می‌شود. در این مرحله، همزمان با تهیه نقشه زمین‌شناسی، بالغ بر ۵۰ نمونه سنگی از رخنمون‌ها، ترانشه‌ها و مغزه‌های حفاری برداشت و به آزمایشگاه‌های مربوطه ارسال شد. در مرحله مطالعات آزمایشگاهی، پس از بررسی‌های مقدماتی، از میان نمونه‌های برداشت شده، تعداد ۱۲ مقطع نازک، ۲۵ مقطع نازک-صیقلی و سه مقطع دوبرصیقلی تهیه و به منظور مطالعات سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری، ساخت، بافت و میانبارهای سیال مطالعه شدند. پس از مطالعه نمونه‌ها در مقیاس‌های نمونه دستی و زیر میکروسکوپ، ۱۲ نمونه معرف، به منظور تعیین فراوانی اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی و کمیاب با روش‌های XRF و ICP-MS انتخاب و آماده‌سازی شدند. نمونه‌ها از توده مونزو دیوریت-مونزوگابروی میزان کانه‌زنی (چهار نمونه)، کانی‌های مگنتیت (سه نمونه) و آپاتیت (پنج نمونه) انتخاب شدند. برای آماده‌سازی، تمامی نمونه‌ها توسط سنگ‌شکن فکی در اندازه‌های کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر

## مقدمه

عمده کانسارهای آهن-آپاتیت شناسایی شده ایران، در دو ناحیه بافق (Mücke and Yousefi, 1994; Majidi et al., 2021; Rahimi et al., 2016) در شمال‌غرب کشور رخداد دارند و به عنوان مهم‌ترین ذخایر طارم (Nabatian et al., 2013; Mokhtari et al., 2017) تیپ IOA مطالعه و معرفی شده‌اند. در ایران مکانیزم‌های ذخیره IOA (Nabatian et al., 2015). البته در چند سال اخیر تعدادی ذخیره در ارتباط با ماقمایتیسم کمان ماقمایی ارومیه-دختر نیز شناسایی و معرفی شده‌اند. رخداد کانسنسنگ‌های آهن-آپاتیت در سنگ‌های آتشفسانی-ماگمایی گستره بولاق (شمال‌غرب ساوه) مهم‌ترین نمونه آن است (گروه معدنی و بازرگانی زرمش، [www.Zarmesh.com/nproject/](http://www.Zarmesh.com/nproject/)).

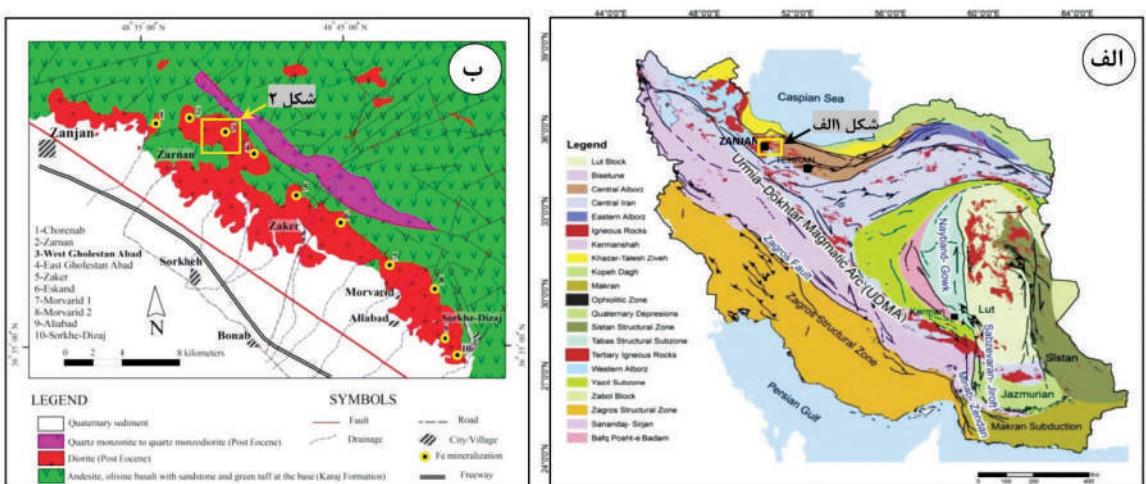
ایالت فلززایی طارم که در پهنه‌های البرز غربی-آذربایجان قرار دارد (شکل ۱-الف)، میزبان مجموعه‌ای از ذخایر اکسید آهن-آپاتیت در شرق شهر زنجان می‌باشد (نباتیان، ۱۳۹۱). از مهم‌ترین نمونه‌های این تیپ از ذخایر می‌توان به کانسارهای سرخه‌دیزج (نباتیان، ۱۳۸۷؛ سالاروند، ۱۳۹۸؛ Nabatian and Ghaderi, 2013)، زریان (گراوندی، ۱۴۰۰)، گلستان‌آباد (عرب زوزنی، ۱۳۹۹؛ کردیان، ۱۳۹۹)، صحتی، (۱۴۰۲)، ذاکر (خان‌محمدی، ۱۳۸۷؛ واقفی، ۱۴۰۲)، اسکند (واقفی، ۱۴۰۲)، آراسو (دادی، ۱۳۹۸)، علی‌آباد-مروارید (مظہری، ۱۳۸۹) اشاره کرد (شکل ۱-ب). کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد در فاصله ۱۰ کیلومتری شمال‌شرق زنجان و ۲/۵ کیلومتری شمال‌شرق روستای زریان واقع شده است. لازم به ذکر است در فاصله شش کیلومتری شرق روستای زریان، کانسار دیگری با نام «معدن آهن گلستان‌آباد» مشغول به فعالیت و استخراج کانسنسنگ آهن است و در سال‌های اخیر توسط کردیان (۱۳۹۹) و صحتی (۱۴۰۲) مورد مطالعه قرار گرفتند. لازم به ذکر است کانسار موضوع پژوهش حاضر، که با نام "کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد" مورد مطالعه قرار دارد، در فاصله هواپی چهار کیلومتری شمال‌غرب معدن (کانسار) گلستان‌آباد (کردیان، ۱۳۹۹؛ صحتی، ۱۴۰۲) واقع شده و به لحاظ ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانی‌سازی، شباهت‌ها

قطعه بخ<sup>۳</sup> با استفاده از فرمول ارائه شده توسط هال و همکاران (Hall et al., 1988) و مقایسه با روش استرنر و همکاران (Sterner et al., 1988) محاسبه شده است.

### زمین‌شناسی

کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد در پهنه‌های بزرگ‌غربی-آذربایجان (آقانباتی، ۱۳۸۳) و در زیرپهنه طارم (Nabatian and Ghaderi, 2013) واقع شده است (شکل ۱-الف). این گستره در نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰/۰۰۰ چهارگوش زنجان طارم (امینی و امینی چهرق، ۱۳۷۹) قرار دارد. براساس نقشه و گزارش زمین‌شناسی ۱:۱۰۰/۰۰۰ ورقه طارم، روند عمومی ساختارهای زمین‌شناسی، همسان با دیگر مناطق البرز غربی، شمال غرب-جنوب‌شرقی می‌باشد. بی‌سنگ قدیمی این ناحیه از سنگ‌های آتش‌فشانی-رسوبی دگرگون شده منسوب به پرکامبرین تشکیل شده است. در ائوسن بر اثر فازهای کششی، حجم زیادی از گدازه‌های آتش‌فشانی و مواد آذرآواری به همراه نهشته‌های رسوبی نهشته شده است. بیشتر سنگ‌های گدازه‌ای و پیروکلاستیکی در این زیرپهنه، که از آندزیت، الیوین بازالت، ماسه‌سنگ و توف تشکیل شده‌اند،

خرد و سپس به آزمایشگاه‌های مربوطه ارسال شدند. آنالیز اکسیدهای اصلی به روش XRF در آزمایشگاه بخش زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس و آنالیز عنصرهای فرعی و کمیاب به روش ICP-MS در آزمایشگاه شرکت مطالعات مواد معدنی زرآما به انجام رسید. برای پردازش و تحلیل داده‌های حاصل از آنالیز ژئوشیمیابی اکسیدهای اصلی، عنصرهای فرعی و کمیاب و رسم نمودارها، از نرم‌افزارهای GCDkit و Minpet، Excel استفاده شده است. مطالعات میانبارهای سیال بر روی پنج نمونه از کانی‌های آپاتیت انجام شد. اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی با استفاده از دستگاه میانبار سیال مدل Linkam THMSG600 متصل به TMS94 میکروسکوپ Zeiss و مجهز به کنترل‌کننده حرارتی LNP در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شده است. دامنه حرارتی دستگاه، ۱۹۶-۱۶۰ درجه سانتی‌گراد است. کالیبراسیون دستگاه در مرحله گرمایش با دقت  $\pm 0.6$  درجه صورت گرفت و با نیترات سوزیم با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد و در مرحله سرمایش با دقت  $\pm 0.2$  درجه سانتی‌گراد و با ماده استاندارد آن-هگزان<sup>۱</sup> با نقطه ذوب ۹۴/۳ درجه سانتی‌گراد انجام شد. میزان شوری به صورت معادل درصد وزنی نمک طعام<sup>۲</sup> و از طریق دمای ذوب آخرين

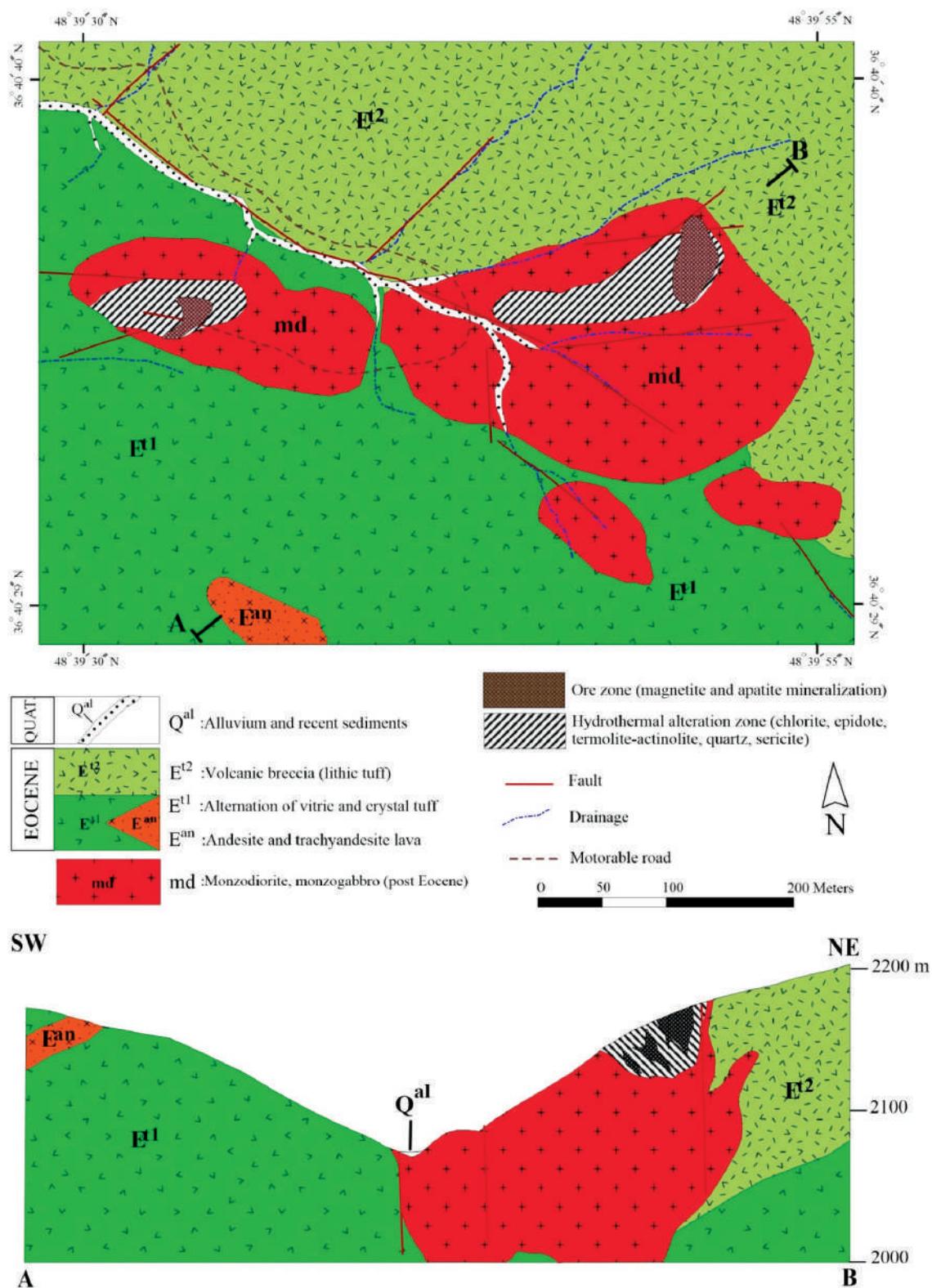


شکل ۱. (الف) نقشه پهنه‌های رسوبی-ساختاری ایران (آقانباتی، ۱۳۸۳)، (ب) نقشه زمین‌شناسی ساده شده ذخایر آهن زنجان، با کمی تغییرات از نباتیان و قادری (Nabatian and Ghaderi, 2013)، موقعیت کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد با چهارگوش سیاه رنگ بر روی نقشه مشخص شده است

1. n-Hexane

2. wt.% NaCl equiv.

3. Tm-ice



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ گستره اکتشافی غرب گلستان‌آباد

شده‌اند (شکل ۳-الف). کانی‌های مذکور پنج تا ۲۰ درصد از سطح مقطع را تشکیل داده و در خمیره‌ای از شیشه، که کموبیش چار شیشه‌زدایی (دویتریفیکاسیون) شده‌اند، پراکنده هستند. این واحد گاه واجد ساخت و بافت‌های نواری-جریانی (ایگنمنبریتی) هستند و از نوارهای جریانی ناپیوسته با ضخامت‌های کمتر از یک سانتی‌متر تشکیل شده است. ترکیب سنگ‌شناسی این میان‌لایه‌ها ریولیتی می‌باشد و از بلورهای کوارتز، پلاژیوکلاز و آلکالی‌فلدسپار در خمیره‌ای از خاکستر (شیشه) تشکیل شده است. خمیره، کم و بیش متحمل دگرسانی و شیشه‌زدایی (دویتریفیکاسیون) شده است.

**واحد E<sup>an</sup>:** این واحد با رنگ رخنمون قهوه‌ای تیره تا سیاه (جلای ورنی) و رنگ سطح شکسته سبز تا خاکستری تیره، رخنمون کوچکی در جنوب‌غرب گستره را دارا است. براساس مطالعات میکروسکوپی، نمونه‌های برداشت شده از واحد E<sup>an</sup> متعلق به یک واحد گدازه‌ای با ترکیب آندزیت-تراکی آندزیتی است و واحد بافت پورفیری با خمیره‌ای شیشه‌ای می‌باشد و در آن پورفیروblast‌ها متتشکل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و مقادیر فرعی آلکالی‌فلدسپار، کانی‌های مافیک، کوارتز و کانی‌های کدر هستند (شکل‌های ۳-ب و ۳-ج). در بخش‌هایی از مقطع، به‌واسطه هم رشدی کانی‌های فنوکریست، بافت گلومرومپورفیریک قابل مشاهده است. بلورهای پلاژیوکلاز که گاه دارای بافت غربالی هستند، به‌صورت کانی‌های نیمه‌شکل دار تا خودشکل و در اندازه‌های ۰/۳ تا ۰/۱ میلی‌متر فراوان ترین می‌باشد و نشانه کلسیک‌تر در مرکز بلورها بیشتر از حاشیه‌آنها می‌باشد و نشانه کلسیک‌تر بودن مرکز بلورها و منطقه‌بندی عادی در پلاژیوکلازها است. وجود هسته کلسیک در پلاژیوکلازها، نشانه تبلور زودهنگام این کانی‌ها از مذاب اولیه می‌باشد. کانی‌های مافیک، که پنج تا ۱۰ درصد از سطح مقطع را تشکیل داده‌اند، اغلب به‌طور کامل توسط کلریت، اپیدوت، کلسیت و اکسیدهای آهن جانشین شده‌اند. خمیره شیشه‌ای سنگ، کموبیش چار شیشه‌زدایی (دویتریفیکاسیون) شده است.

**واحد E<sup>t</sup>:** این واحد که با رنگ خاکستری روشن، گستره

متعلق به سازند کرج هستند (Hirayama et al., 1966) و پس از این در اثر تزریق سنگ‌های نفوذی بعد از ائوسن قرار دارند. این سازند در البرز غربی و مرکزی، بخشی از مجموعه ماقمایی البرز به سن ائوسن است که در محیط تکتونیکی کمان و پشت‌کمانی و رژیم کششی بعد از برخورد نهشته شده است (Berberian and King, 1981; Hassanzadeh et al., 2008; Mirnejad et al., 2010; Asiabana and Foden, 2012).

واحدهای سنگی رخنمون یافته در نقشه زمین‌شناسی گستره کانسار غرب گلستان آباد با مقیاس ۱:۱۰۰۰، شامل یک توالی از سنگ‌های آتش‌شکانی متعلق به سازند کرج (ائوسن) مشتمل از توف و گدازه‌های با ترکیب حدواسط (آندزیت تراکی آندزیت) می‌باشد و توسط توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق موژزو-دیوریت-موژزو-گابروی با سن ائوسن پایانی-الیگوسن قطع شده است (شکل ۲). به‌طور خلاصه، زمین‌شناسی واحدهای سنگی در گستره کانسار غرب گلستان آباد به شرح زیر است:

**واحد E<sup>t</sup>:** این واحد با رنگ رخنمون خاکستری روشن نزدیک به نیمی از گستره را پوشش داده و بلندترین ارتفاعات گستره را شامل شده است. واحد E<sup>t</sup> از تناوب ویتریک‌توف و کریستال‌توف همراه با میان‌لایه‌ای از ایگنمنبریت تشکیل شده است. براساس مطالعات میکروسکوپی، توف‌های بلورین (کریستال‌توف) دارای بافت پورفیروکلاستیک هستند و مشتمل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و مقادیر فرعی کوارتز، آلکالی‌فلدسپار، کانی‌های مافیک و کانی‌های کدر هستند. بلورهای پلاژیوکلاز به‌صورت کانی‌های نیمه‌شکل دار تا خودشکل و در اندازه‌های ۰/۳ تا ۰/۱ میلی‌متر فراوان ترین می‌باشد و اغلب به‌طور جزئی توسط سریسیت، کلسیت و کانی‌های رسی جانشین شده‌اند. کانی‌های مافیک، که به‌طور معمول کمتر از ۱۰ درصد از سطح مقطع را تشکیل داده‌اند، اغلب به‌طور کامل توسط کلریت، کلسیت، سریسیت و اکسیدهای آهن جانشین شده‌اند. توف‌های شیشه‌ای (ویتریک‌توف) دارای بافت ویتروکلاستیک هستند و بیشتر از خاکستر (شیشه) همراه با بلورهای پراکنده پلاژیوکلاز، کوارتز، آلکالی‌فلدسپار و کانی‌های کدر تشکیل

مافیک (بیشتر هورنبلنده و گاه بیوتیت) را شامل می‌شوند. پلازیوکلازها کم‌وبیش به سریسیت و کلسیت دگرسان شده‌اند. کانی‌های مافیک نیز اغلب به طور کامل توسط کلریت، اپیدوت، کلسیت، کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن جانشین شده‌اند. با توجه به شکل کانی دگرسان شده و نوع محصولات جانشینی، شاید کانی‌های مافیک از نوع بیوتیت و آمفیبول باشند. خمیره سنگ، کربپتوکریستالین تا شیشه‌ای هستند و از شیشه آتشفسانی دگرسان شده، میکرولیت‌های پلازیوکلاز، کوارتز، کانی‌های کدر و کانی‌های دگرسانی تشکیل شده است.

قابل توجهی در شمال و غرب گستره را پوشش داده است، از قطعات سنگی با ابعاد یک میلی‌متر تا پنج سانتی‌متر (و بهندرت تا ۱۰ سانتی‌متر) و اجزای بلورین در خمیره‌ای از خاکستر آتشفسانی تشکیل شده است. قطعات سنگی اغلب از جنس گدازه آندزیتی تا تراکی آندزیتی با بافت پورفیری هستند و اغلب با اشکال گوشه‌دار مشاهده می‌شوند (شکل ۳-۵). فنوکریست‌های موجود در قطعات سنگی اغلب شامل درشت‌بلورهای پلازیوکلاز و کمتر کانی‌های مافیک دگرسان شده (به کلریت، کلسیت، اپیدوت و اکسیدهای آهن) هستند. اجزای بلورین قابل تشخیص در سنگ، بیشتر پلازیوکلازها در همراهی با مقادیر فرعی کانی‌های



شکل ۳. (الف) تصویر میکروسکوپی از سنگ‌های ویتریک‌توف در همراهی با واحد  $E^{11}$ ، (ب و (ج) تصاویر میکروسکوپی از گدازه آندزیت و تراکی آندزیتی ( $E^{an}$ )، (د) تصویر واحد لیتیک‌توف ( $E^{12}$ )، (ه) تصویر میکروسکوپی از توده مونزودیوریت (md) در محدوده غرب گلستان آباد. تصاویر میکروسکوپی در نور عبوری با نیکول‌های متقطع (XPL) برداشت شدند. Afs: آلکالی‌فلدسبار، Hbl: هورنبلنده، Opq: کانی کدر، Pl: پلازیوکلاز، Px: پیروکسن. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوائز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده‌اند

#### مونزودیوریت-مونزوگابرو (md)

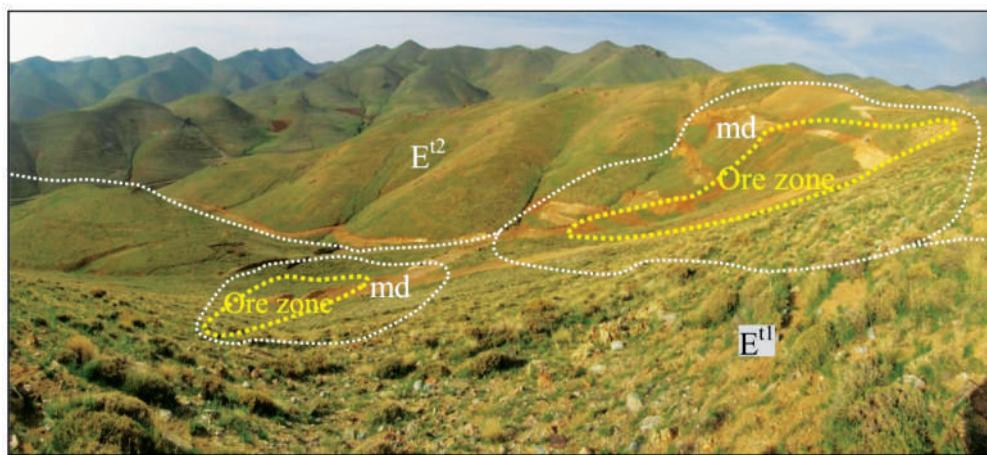
توده‌های نیمه عمیق با ترکیب مونزودیوریت-مونزوگابروی و با رنگ رخنمون خاکستری تا سبز تیره سطح قابل توجهی و با خش‌های میانی گستره را پوشش داده است. توده‌های از بخش‌های کانسنسنگ‌های آهن-آپاتیت هستند و مذکور میزبان اصلی کانسنسنگ‌های آهن-آپاتیت هستند و حجم قابل توجهی از آنها در همبrijی واحدهای آتشفسانی  $E^{11}$

### ساخت، بافت و کانی‌شناسی کانسنگ

کانی‌سازی اکسید آهن-آپاتیت در کانسار غرب گلستان آباد، در دو سینه‌کار استخراجی شرقی و غربی، که حدود ۳۰۰ متر از هم فاصله دارند، بروند دارند (شکل ۴). کانسنگ‌های معدنی در هر دو موقعیت با ساخت و بافت‌های رگه-رگچه‌ای، توده‌ای و دانه‌پراکنده در توده مونزوودیوریت-مونزوگابرویی مشاهده می‌شوند (شکل ۵). کانی‌سازی اغلب به صورت رگه‌های مگنتیت-آپاتیت (و اکتینولیت) در راستای عمومی شرقی-غربی تا شمال شرق-جنوب غربی با طول‌های پنج تا چند ده متر و ضخامت‌های ۱۰/۰ تا دو متر بروند. ضخامت رگه‌ها در داخل ترانشه‌ها گاه به پنج متر نیز بالغ می‌شود.

کانه اصلی در کانسنگ‌ها مگنتیت است و با مقادیر فرعی از کانی‌های آپاتیت، اکتینولیت و کانی‌های سولفیدی (پیریت $\pm$ کالکوپیریت) همراهی می‌شود. بیشینه فراوانی اکسیدهای آهن ( $\text{FeO}$ ) و اکسید فسفر ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) در کانسنگ‌های معدنی به ترتیب  $70/3$  و  $16/9$  درصد اندازه‌گیری شده است (شرکت خدمات اکتشافی کشور، ۱۳۹۶).

ریزبلور (میکروگرانولار) تشکیل شده‌اند (شکل ۵-۳). پلاژیوکلازها به صورت بلورهای نیمه‌شکل دار تا خودشکل و در اندازه‌های ۲۰۰ میکرون تا سه میلی‌متر، حدود ۴۰ درصد از سطح مقطع را تشکیل داده‌اند. پلاژیوکلازها اغلب به طور جزئی توسط سریسیت و کمتر توسط کلسیت جانشین شده‌اند. پیروکسن‌ها در اندازه‌های کوچک‌تر از  $1/5$  میلی‌متر، پنج تا ۱۰ درصد از سطح مقطع را پوشش داده‌اند. پیروکسن‌ها به طور جزئی تا قابل توجه توسط کلریت و کمتر توسط کانی‌های کربنات (کلسیت)، اپیدوت و اکسیدهای آهن جانشین شده‌اند. آلکالی‌فلدسپارها به صورت بلورهای بی‌شکل در اندازه‌های  $4/0$  تا دو میلی‌متر، پنج تا ۱۰ درصد از سطح مقطع را تشکیل داده‌اند. کانی‌های مذکور اغلب به طور جزئی توسط کلسیت و سریسیت جانشین شده‌اند. در یکی از مقاطع مطالعه شده، تعداد انگشت‌شماری از فنوکریست‌های نیمه‌شکل دار کوارتز با اندازه‌های  $3/0$  تا  $5/0$  میلی‌متر مشاهده شده است. کانی‌های نیمه‌شکل دار تا خودشکل کدر (اغلب مگنتیت) در اندازه‌های  $50$  تا  $400$  میکرون و با فراوانی سه تا پنج درصد در سطح مقاطع مورد مطالعه پراکنده‌اند.



شکل ۴. تصویری از گسترش زون‌های کانی‌سازی در سنگ میزان مونزوگابرو (md) که در واحدهای آتشفسانی ائوسن (واحدهای E<sup>t1</sup> و E<sup>t2</sup>) تزریق شده‌اند، دید به سوی شمال

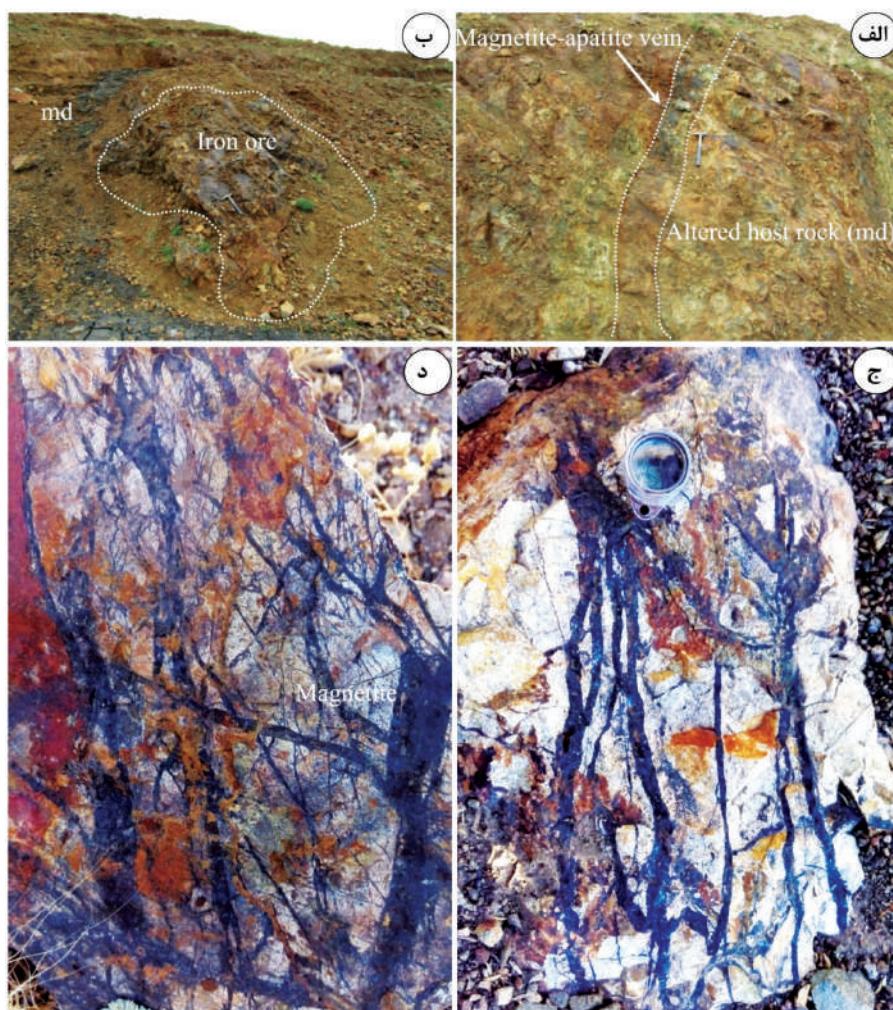
در گستره شامل اکتینولیتی شدن، سیلیسی شدن، سریسیتی شدن، پروپیلیتی شدن و سولفیدی شدن هستند. دگرسانی اکتینولیتی ( $\pm$  ترمولیت)، پروپیلیتی و سولفیدی اغلب در همراهی و نیز در اطراف کانسنگ‌های آهن-آپاتیت قابل مشاهده هستند.

جایگیری توده مونزوودیوریت-مونزوگابروی (md) در سنگ‌های آتشفسانی ائوسن (واحدهای E<sup>t1</sup> و E<sup>t2</sup>) و متعاقب آن، صعود سیالات گرمابی نشأت گرفته از توده مذکور، به رخداد دگرسانی و کانی‌سازی در توده نفوذی میزان کانسار منجر شده است. مهمترین دگرسانی‌های گرمابی رخ داده

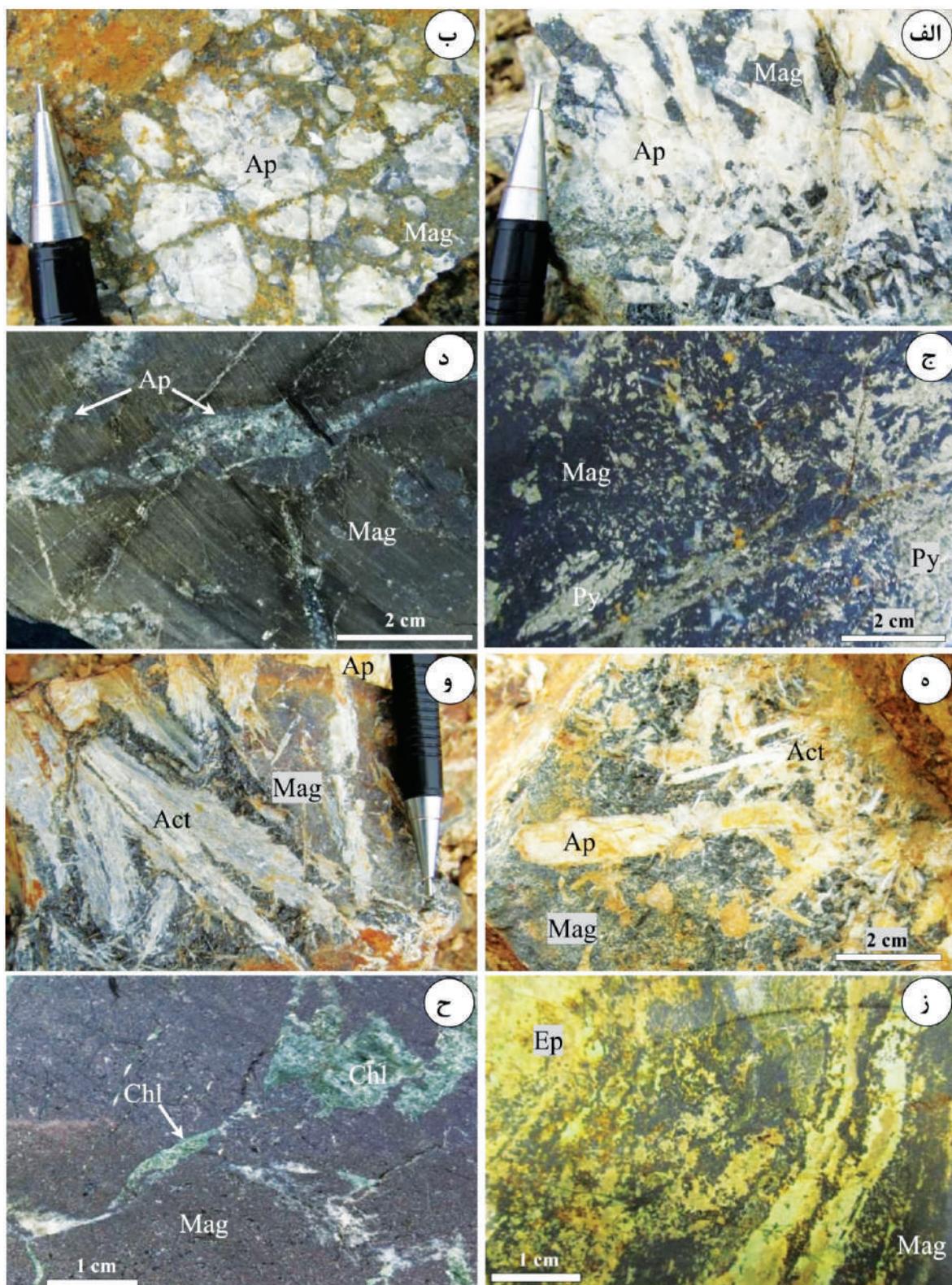
توده‌ای، رگچه‌ای و دانه‌پراکنده هستند، ولی در قسمت‌هایی از کانسنگ ممکن است توسط کانی‌های دگرسانی تأخیری قطع شده و بافت خرد و برشی شده (کاتاکلاستیک) نشان دهند. در مقیاس‌های نمونه دستی و میکروسکوپی، مگنتیتها در دو نسل رخداد داشته‌اند: (الف) مگنتیت‌ها نسل اول که فراوان‌ترین نوع مگنتیتها را شامل می‌شوند، (± ترمولیت) مشاهده می‌شوند و (ب) مگنتیت‌ها نسل دوم، که به صورت رگچه‌های تأخیری مجموعه مگنتیت-آپاتیت-ترمولیت‌های نسل اول را قطع کرده‌اند. برخی بلورهای مگنتیت از حاشیه‌ها و مرز شکستگی‌ها، مارتیتی شده و به هماتیت تبدیل شده‌اند.

در مقیاس‌های رخنمون و نمونه دستی، کانسنگ‌ها اغلب به صورت رگ-رگچه‌ای، برشی و کمتر توده‌ای و دانه‌پراکنده مشاهده می‌شوند. براساس مطالعه و بررسی میکروسکوپی مقاطع نازک-صیقلی، کانسنگ‌ها از کانی‌های فلزی مگنتیت، هماتیت، پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت، کوولیت و ترکیبات هیدروکسیدی آهن و کانی‌های غیرفلزی اکتینولیت، ترمولیت، آپاتیت، کوارتز، کلریت، اپیدوت و سریسیت تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۶ و ۷).

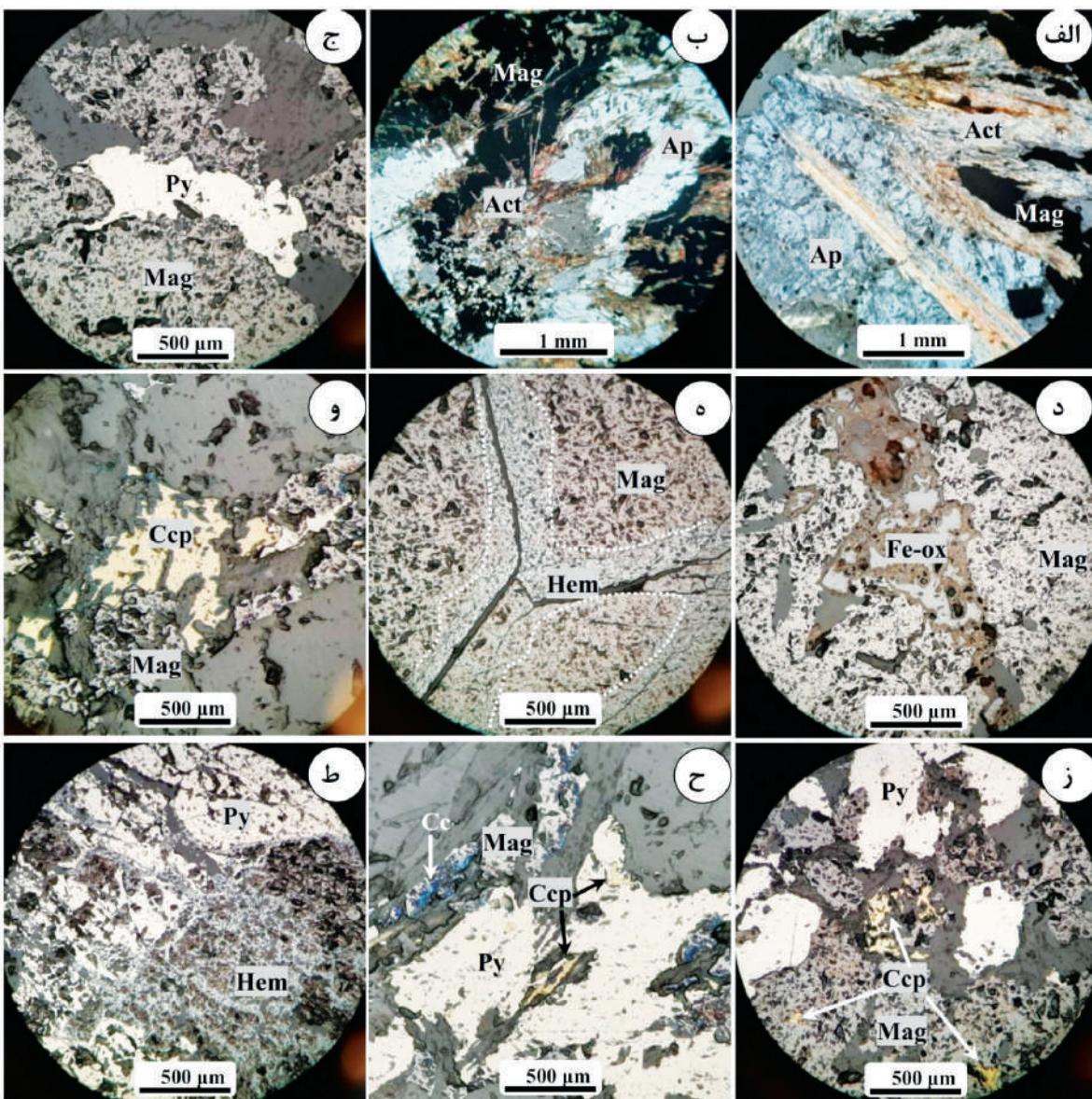
مگنتیت به صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار و گاه خودشکل در اندازه‌های ۱۰۰ میکرون تا پنج میلی‌متر، به طور معمول ۲۰ تا ۹۰ درصد از حجم کانسنگ را تشکیل داده است. مگنتیتها به طور معمول واجد بافت‌های



شکل ۵. (الف) تصویری از رخنمون کانسنگ آهن (مگنتیت) و آپاتیت با ساخت رگه‌ای در توده مونزو-دیوریت-مونزوگابرو (md) که در اطراف با دگرسانی‌های گرمابی همراه است، (ب) تصویر دیگری از رخنمون کانسنگ کانی‌سازی آهن (مگنتیت) با ساخت رگ-رگچه‌ای (استوکورک) در توده مونزو-دیوریت-مونزوگابرو، در قسمت‌هایی از تصویر "د" ساخت برشی نیز مشهود است



شکل ۶. تصاویری از ساخت، بافت و کانی‌شناسی کانسنگ‌های آهن و آپاتیت در کانسار غرب گلستان‌آباد در مقیاس دستی،  
الف و ب) همرشدی مگنتیت و آپاتیت‌های شکل‌دار، ج) رخداد پیریت در همراهی آپاتیت، د) رگچه‌های آپاتیت، کانسنگ مگنتیتی را قطع  
کرده‌اند، ه و و) همرشدی آپاتیت، مگنتیت و اکتینولیت، ز) دگرسانی اپیدوت که بر روی کانسنگ مگنتیتی رونقش شده است، ح) رگچه‌های  
انباسته از کلریت، کانسنگ مگنتیتی را قطع کرده‌اند. Act: اکتینولیت، Ap: آپاتیت، Chl: کلریت، Ep: اپیدوت، Mag: مگنتیت. نشانه‌های  
اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوونز (Whitney and Evans 2010) اقتباس شده‌اند



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی، (الف و ب در نور عبوری با نیکول‌های متقاطع، XPL، یقیه تصاویر در نور انعکاسی) از کانی‌های فلزی و روابط بافتی در کانسنگ‌های آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد، (الف و ب) همرشدی آپاتیت، مگنتیت و اکتینولیت، (ج) رگچه پیریت، مگنتیت‌ها را قطع کرده است، (د) رگچه انباسته از ترکیبات هیدروکسیدی آهن، که احتمالاً از اکسایش کانه‌های سولفیدی حاصل شده‌اند، بلورهای مگنتیت را قطع کرده است، (ه) بلورهای مگنتیت از حاشیه توسط هماتیت جانشین شده‌اند، و (ز) همرشدی مگنتیت و کالکوپیریت، کالکوپیریت و مگنتیت، (ح) رگچه کالکوپیریت، بلورهای پیریت و مگنتیت را قطع کرده و کالکوپیریت نیز به صورت بخشی توسط کالکوسیت جانشین شده است، (ط) همرشدی پیریت و هماتیت، Apt: آپاتیت، Act: اکتینولیت، Fe-ox: کالکوپیریت، Ccp: کالکوسیت، Ce: آپاتیت، Py: ترکیبات هیدروکسیدی آهن، Hem: هماتیت و py: پیریت. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوائز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است

اکسایش یافته و توسط ترکیبات هیدروکسیدی آهن جانشین

پیریت‌ها به صورت بلورهای بی‌شکل تا خودشکل و در اندازه‌های ۵۰ میکرون تا ۱/۵ میلی‌متر، به طور معمول کمتر شده‌اند.

کالکوپیریت‌ها به صورت بلورهای بی‌شکل در اندازه‌های کوچکتر از یک میلی‌متر و با فراوانی ناچیز در سطح مقطع پراکنده‌اند. کالکوپیریت‌ها نیز در همراهی با هر دو نسل از مجموعه‌های کانی‌ایی مگنتیت-آپاتیت و اکتینولیت مشاهده

پیریت‌ها به صورت بلورهای بی‌شکل تا خودشکل و در اندازه‌های ۵۰ میکرون تا ۱/۵ میلی‌متر، به طور معمول کمتر از یک درصد سطح مقطع را پوشش داده‌اند. پیریت به عنوان فراوان‌ترین کانه سولفیدی، در همراهی با مجموعه‌های مگنتیت-آپاتیت و اکتینولیت‌های نسل‌های اول و دوم قابل مشاهده است. در نمونه‌های سطحی، پیریت‌ها کم‌ویش

(نسل اول) و ب) مگنتیت-آپاتیت-اکتینولیت (نسل دوم) مشاهده می‌شوند. تیغه‌های اکتینولیت گاه به صورت میانبار در داخل آپاتیت‌های نسل اول دیده شده است. اندازه بلورهای اکتینولیت به طور معمول از یک میلی‌متر تا دو سانتی‌متر در تغییر است و به طور معمول در مقادیر جزئی تا قابل توجه توسط کربنات (کلسیت) جانشین شده‌اند. آپاتیت و با فراوانی کمتر کلریت از دیگر کانی‌های دگرسانی مشاهده شده در نمونه‌های کانسنگی هستند که به طور معمول در مرحله پایانی تکامل کانسنگ تشکیل شده و مجموعه کانی‌های مگنتیت-آپاتیت و اکتینولیت (نسل اول) را قطع کرده‌اند.

با توجه به روابط بافتی و کانی‌شناسی نمونه‌های کانسنگی مطالعه شده در مقیاس‌های نمونه دستی و میکروسکوپی، توالی پاراژنزی کانی‌ها در کانسار اکسید آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد در شکل ۸ رسم شده است.

شده‌اند. کالکوپیریت‌ها گاه از حاشیه بلور و مرز شکستگی‌ها توسط کالکوسیت، کوولیت و ترکیبات هیدروکسیدی آهن جانشین شده‌اند.

آپاتیت به عنوان شاخص‌ترین کانی همراه با مگنتیت‌ها و به صورت بلورهای متوسط تا درشت‌بلور در اندازه‌های ۰/۱ تا پنج سانتی‌متر در بیشتر کانسنگ‌ها قابل مشاهده است. در نمونه‌های دستی اغلب، بلورهای آپاتیت به رنگ‌های سفید تا خاکستری روشن و گاه صورتی دیده می‌شوند. در مقیاس‌های نمونه دستی و میکروسکوپی، آپاتیت‌ها در همراهی با مگنتیت و اکتینولیت در دو نسل تشکیل شده‌اند، فراوان‌ترین رخداد آپاتیت‌ها در همراهی با مگنتیت و اکتینولیت‌های نسل اول قابل مشاهده است.

اکتینولیت، دیگر کانی شاخص همراه با کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت در این کانسار است و به صورت بلورهای کشیده منشوری و سوزنی‌شکل در دو نسل و به صورت مجموعه کانی‌ایی (الف) مگنتیت-آپاتیت-اکتینولیت

Minerals	Mineralization	Supergen (weathering)
Magnetite	—	
Pyrite	—	
Chalcopyrite	—	
Hematite	—	
chalcocite-covelite		
Fe-hydroxides		—
Apatite	—	
Quartz	—	
Actinolite-termolite	—	
Chlorite	—	
Epidote	—	
structures and textures	Disseminated	
	Stockwork	—
	Massive	—

شکل ۸. نمودار توالی پاراژنزی در کانسنگ‌های آهن-آپاتیت کانسار غرب گلستان‌آباد

نمودارهای متعددی برای نامگذاری سنگ‌های آتشفشنانی براساس ترکیب شیمیایی آنها ارائه شده است. از مهمترین آنها می‌توان به نمودارهای کاکس و همکاران (Cox et al., 1979) و میدل‌موست (Middlemost, 1994) اشاره کرد. بر طبق این دو نمودار، که براساس تغییرات میزان سیلیس ( $\text{SiO}_2$ ) در مقابل مجموعه آلکالی ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) رسم می‌شوند، سنگ‌های نفوذی گستره غرب گلستان‌آباد در قلمرو مونزو‌دیوریت و مونزو‌گابرو قرار می‌گیرند (شکل ۹).

**رده‌بندی شیمیایی، سری ماگمایی و جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های میزبان کانی‌سازی**  
به‌منظور تعیین فراوانی اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و کمیاب، چهار نمونه از توده مونزو‌دیوریت-مونزو‌گابروی میزبان کانی‌سازی در کانسار غرب گلستان‌آباد برداشت و با استفاده از روش‌های XRF و ICP-MS آزمایشگاهی بخش زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس و شرکت مطالعات مواد معدنی زرآزمآ آنالیز شدند (جدول ۱).

جدول ۱. داده‌های تجزیه شیمیایی عنصرهای اصلی (بر پایه درصد وزنی یا wt.%) و عنصرهای کمیاب (بر پایه گرم در تن یا ppm)، الف) سنگ میزبان نفوذی با ترکیب مونزو‌دیوریت-مونزو‌گابرو (md)، ب) بلورهای مغنتیت (Mag)، ج) بلورهای آپاتیت (Ap) در گستره کانسار آهن غرب گلستان‌آباد

Sample Type	G-1 Ap	G-33 Ap	G-18 Ap	G-41 Ap	G-65 Ap	G-28 Mag	G-31A Mag	G-31B Mag	G-27 md	G-49 md	G-50 md	G-3 Md
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0/124	0/084	0/18	0/027	0/102	0/57	1/06	1/03	14/75	16/46	16/74	14/55
CaO	49/82	48/222	46/188	49/99	0/539	0/46	3/02	2/67	2/25	1/35	2/94	0/04
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0/854	2/447	2/248	1/123	3/522	8/322	76/09	78/01	15/58	12/97	13/14	15/08
$\text{K}_2\text{O}$	0/010	0/005	0/018	0/012	0/006	0/07	0/08	0/08	4/04	4/86	3/84	2/91
MgO	0/63	0/745	0/152	0/907	1/389	0/90	1/34	1/66	9/4	8/43	8/29	9/12
MnO	0/068	0/092	0/09	0/105	0/061	0/11	0/12	0/13	0/07	0/09	0/09	0/07
$\text{Na}_2\text{O}$	0/073	0/012	0/116	0/052	3/47	0/32	0/33	0/34	2/80	2/60	3/18	4/04
$\text{P}_2\text{O}_5$	42/17	40/33	39/80	41/77	40/366	0/50	3/45	3/04	0/48	0/29	0/33	0/24
$\text{SiO}_2$	2/95	4/772	7/943	2/22	3/268	12/42	13/03	11/44	47/82	48/50	49/07	48/90
SO <sub>3</sub>	0/059	0/056	0/049	0/187	0/054	0/02	0/02	0/02	0/02	0/02	0/02	0/02
$\text{TiO}_2$	0/024	0/06	0/038	0/017	0/008	1/13	1/25	1/28	0/94	1/25	0/87	0/89
LOI	3/10	2/97	2/24	4/09	2/74	0/32	0/17	0/42	1/85	3/45	1/67	2/85
Total	99/90	99/87	99/86	99/94	100/14	100/04	99/96	100/07	99/86	100/27	99/97	99/81
Ag	0/08	0/1	0/1	0/1	0/1	0/2	0/3	0/3	0/1	0/1	0/1	0/1
As	100	100	100	100	100	0/8	11/9	9/1	4/3	4/8	4	4/8
Ba	5	6	5	8	4	8	9	9	196	575	334	213
Be	0/4	0/4	0/5	0/4	0/4	0/7	1/3	1/1	1/3	1/8	2/3	1/4
Bi	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
Cd	1/6	1/7	1/6	1/5	2/3	0/2	0/1	0/2	0/1	0/1	0/1	0/2
Co	1	1	1/5	1	2/6	11/9	28/4	30/8	16/9	15/8	15/4	18/1
Cr	8	8	7	8	7	15	119	97	76	56	84	73
Cs	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	4	5	4/1	4/3
Cu	0/75	1	1	1	2	1	1	1	50	7	7	11
Hf	0/99	0/9	0/78	1/12	0/94	0/5	0/5	0/5	0/7	0/5	0/83	0/59
In	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5
Li	1	1	1	1	1	1	1	1	27	26	12	27
Mo	0/5	0/5	0/2	0/6	1/2	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1

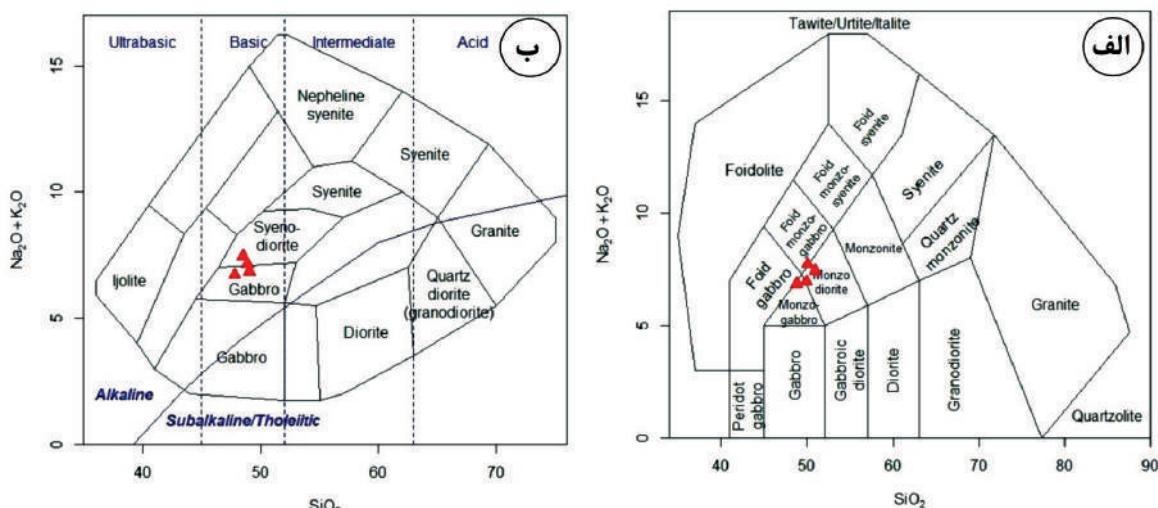
ادامه جدول ۱.

Sample Type	G-1 Ap	G-33 Ap	G-18 Ap	G-41 Ap	G-65 Ap	G-28 Mag	G-31A Mag	G-31B Mag	G-27 md	G-49 md	G-50 md	G-3 Md
Nb	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۹/۸	۱۶/۷	۹/۳	۱۰/۳
Ni	۳	۳	۸	۳	۶	۴۷	۴۰	۴۱	۲۶	۱۳	۱۷	۱۷
Pb	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۴	۶	۲۰	۵۴	۱۳
Rb	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۶۹	۱۸۷	۱۷۷	۱۴۵
Sb	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
Sc	۰/۹	۰/۹	۲	۱/۱	۲/۱	۱/۵	۲۳	۲/۳	۲۷/۶	۳/۶	۲۶	۳۰/۲
Se	۴۶/۸۹	۴۹/۱۵	۴۲/۶۳	۵۷/۷	۴۹/۴۲	۰/۵	۱/۸۶	۱/۵۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
Sn	۰/۳	۰/۴	۰/۴	۰/۳	۰/۴	۲/۴	۲/۵	۲/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۲	۱/۴
Sr	۱۲۳	۱۲۷	۱۱۴	۱۴۲	۱۳۸	۳/۷	۸/۳	۷/۱	۱۸۵	۱۷۲	۲۰۷	۱۸۷
Ta	۰/۳۷	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۲۲	۰/۲	۰/۲۳	۰/۵۹	۰/۷۷	۰/۵۹	۰/۶۸
Te	۰/۲۹	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Th	۳۲/۲۳	۳۸/۹۵	۳۲/۳۹	۴۳/۱۷	۵۳/۹۳	۸/۲۵	۱۴/۰۶	۱۱/۸	۴/۹۹	۵/۳۸	۱/۹۱	۷/۰۵
Tl	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۳۳	۰/۵۴	۰/۵۱	۰/۳۳
U	۵/۳	۵/۹	۳/۸	۶/۷	۱۴/۵۹	۱/۸	۳	۲/۸۱	۱/۵	۱/۷	۱/۱	۱/۷
V	۵۱	۱۰۰	۱۰۳	۶۱	۱۲۰	۲۷۹۶	۲۱۹۷	۲۳۱۵	۴۳۰	۳۷۲	۳۳۷	۳۸۵
W	۱۲/۱	۵/۱	۳/۸	۱/۸	۱/۶	۲/۲	۱/۹	۲/۱	۲/۸	۱/۶	۱/۳	۷/۹
Y	۱۱۲۴	۱۰۵۹	۹۷۷	۱۲۱۱	۱۱۰۰	۳۲/۳	۹۳/۱	۸۲/۶	۱۳/۲	۲۱/۹	۸/۷	۱۵/۴
Zn	۱	۱	۱	۱	۱	۳۱	۲۹	۳۵	۱۷	۳۱	۶۷	۲۴
Zr	۵	۵	۵	۵	۵	۱۸	۱۶	۱۷	۳۴	۳۹	۴۳	۴۱
Ce	۱۶۸۷	۱۶۳۲	۱۴۰۹	۲۵۲۱	۲۱۳۵	۶۸	۱۷۷	۱۴۴	۲۶	۴۱	۲۲	
Dy	۲۱۳	۱۹۷	۱۸۴	۲۴۰	۲۱۰	۷/۸	۱۸/۷۸	۱۶/۷۶	۳/۰۸	۴/۱۳	۲/۴۶	۳/۴۶
Er	۱۱۳	۱۰۶	۹۶/۲۷	۱۲۵	۱۱۳	۳/۶	۱۰/۰۸	۸/۸۸	۱/۷	۲/۲۶	۱/۳۱	۱/۹۱
Eu	۱۳/۵۸	۱۲/۷۴	۱۱/۳۱	۱۷/۳۶	۱۵/۸۳	۰/۶	۱/۳۲	۱/۱۱	۰/۷۳	۰/۷۵	۰/۷۷	۰/۶۹
Gd	۲۸۱	۲۵۸	۲۴۳	۳۳۰	۲۸۹	۹/۴۹	۲۲/۳۸	۲۰/۳۶	۳/۴۳	۴/۱۸	۲/۷۷	۳/۸۸
La	۶۰۱	۵۴۶	۴۹۴	۹۳۴	۸۲۱	۳۵	۷۶	۶۱	۱۸	۱۵	۲۵	۱۶
Lu	۱۰/۷	۱۰/۰۳	۹/۰۳	۱۱/۸۷	۱۰/۹۱	۰/۳۷	۱/۰۱	۰/۸۷	۰/۱۸	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۲۴
Nd	۱۱۵۹	۱۱۰۶	۱۰۱۲	۱۵۸۰	۱۳۶۱	۴۹/۱	۱۰۸	۹۱/۷	۱۷/۷	۱۹/۷	۱۹/۸	۸/۹
Pr	۲۶۱	۲۴۴	۲۲۶	۳۷۰	۳۱۷	۱۱	۲۵/۰۹	۲۰/۳۶	۴/۳۷	۴/۴۷	۵/۰۹	۴/۵۴
Sm	۲۶۴	۲۴۶	۲۲۹	۳۲۵	۲۸۴	۱۰/۱۲	۲۲/۸۳	۲۰/۲۲	۳/۷۳	۴/۱۴	۳/۳۹	۴/۱۳
Tb	۳۲/۳۹	۳۰/۷۶	۲۸/۸۸	۳۸/۲۵	۳۳/۴۶	۱/۲	۲/۸	۲/۶	۰/۵۱	۰/۶۴	۰/۴۲	۰/۵۷
Tm	۱۳/۴	۱۲/۳۲	۱۱/۱	۱۴/۳۷	۱۳/۴	۰/۵۳	۱/۳۱	۱/۱۵	۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۲۳	۰/۳۱
Yb	۷۴/۹	۷۰/۶	۶۳/۵	۸۴/۶	۷۷/۳	۲/۷	۷/۳	۶/۵	۱/۲	۱/۶	۱	۱/۵
ΣREE	۴۵۷۹	۴۳۳۵	۹۷۹۷	۶۴۲۵	۵۵۳۰	۱۱۴	۲۶۱	۲۰۵	۴۲	۴۱	۶۷	۳۸

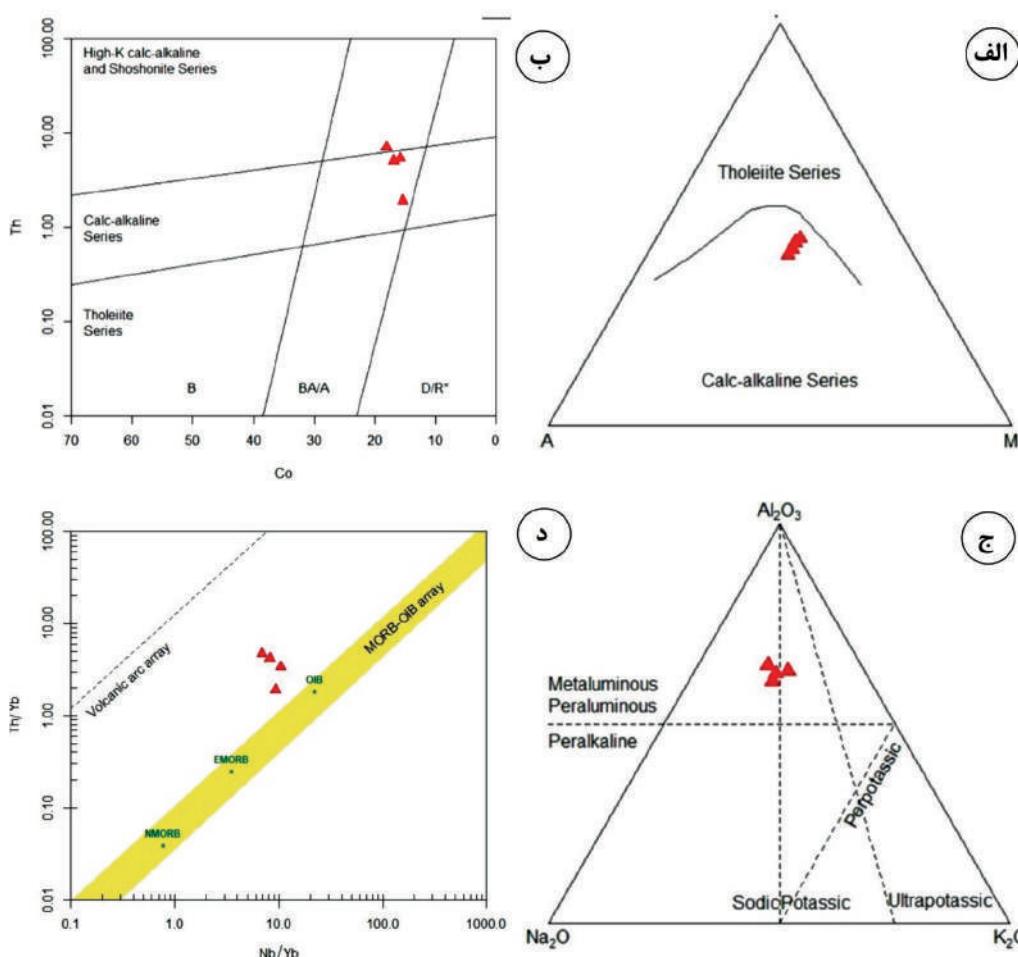
از نمودار سه تایی  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$  که براساس نسبت مولکولی اکسیدهای مذکور بیان شده و برای تعیین میزان آلومین کاربید دارد، نمونه های مورد بررسی در محدوده های متالآلومین و پرآلومین قرار می گیرند (شکل ۱۰-ج).

بر پایه نمودار Th/Yb در مقابل Nb/Yb (Pearce, 2008) که برای تعیین ویژگی های منشأ ماقما طراحی شده

برای تعیین سری های ماگمایی توده میزبان کانی سازی در کانسار غرب گلستان آباد، از دو نمودار AFM (Irvine et al., 2007) و Th (and Baragar, 1971 Co) در مقابل اس تفاهه شده است. براساس نمودارهای ذکر شده، تمامی نمونه ها در قلمرو سری کالکآلکالن قرار می گیرند (شکل های ۱۰-الف و ب). همچنین با استفاده



شکل ۹. طبقه‌بندی ژئوشیمیابی و نامگذاری توده نفوذی نیمه عمیق در محدوده غرب گلستان آباد با استفاده از، الف) نمودار  $\text{SiO}_2$  در مقابل  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (Cox et al., 1979) (b) نمودار  $\text{SiO}_2$  در مقابل  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (Middlemost, 1994)



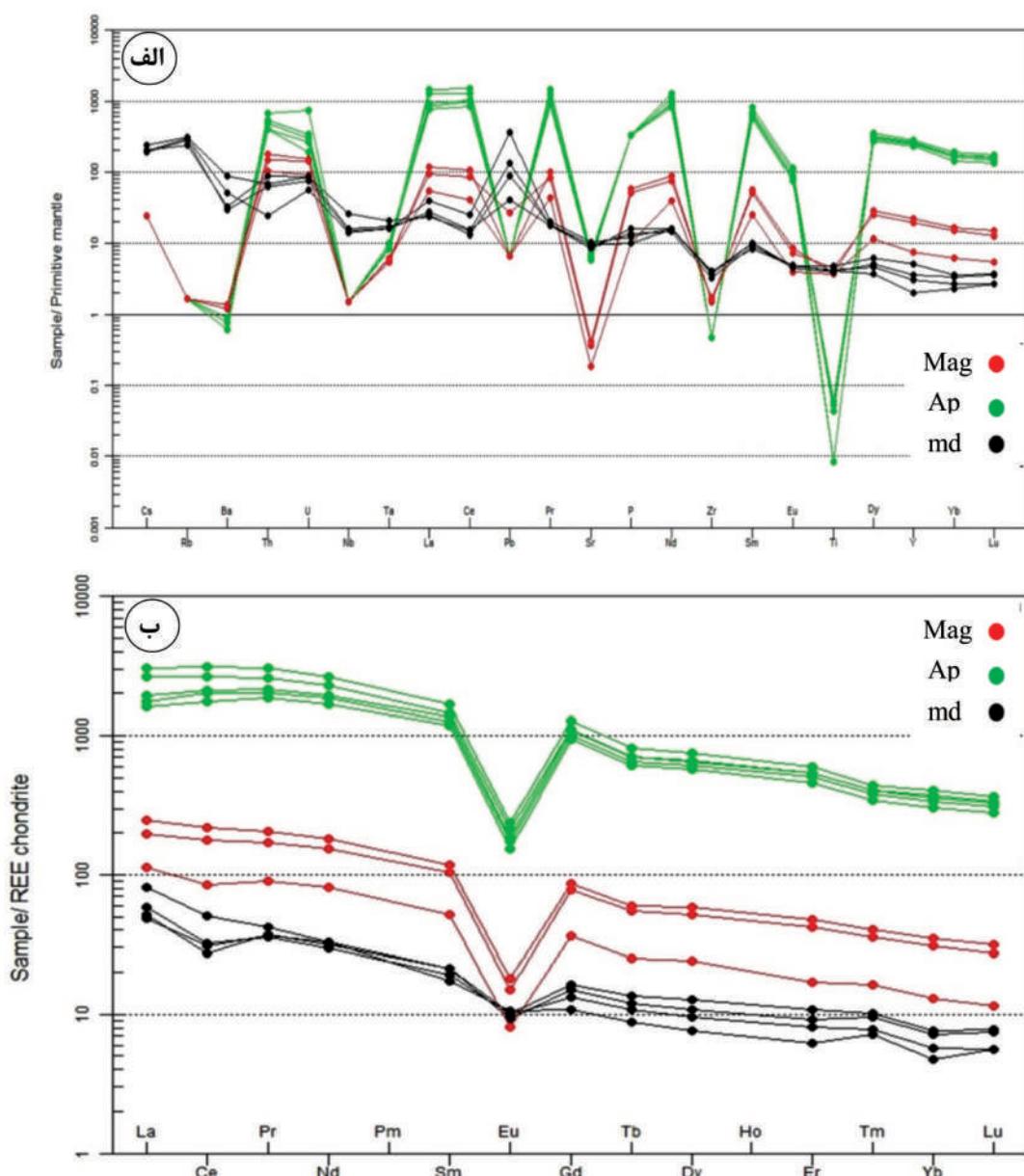
شکل ۱۰. الف) تعیین سری ماقمایی سنگ‌های نفوذی میزان کانی‌سازی گستره غرب گلستان آباد براساس نمودار AFM (Irvine and Baragar, 1971)، ب) تعیین سری ماقمایی سنگ‌های نفوذی براساس نمودار  $\text{Co}$  در مقابل  $\text{Th}$  (Hastie et al., 2007)، ج) تعیین سری ماقمایی سنگ‌های نفوذی با استفاده از نمودار سه‌تایی  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$  (Pearce, 2008)، د) جایگاه تکتونیکی سنگ‌های نفوذی میزان کانی‌سازی با استفاده از نمودار پیرس

نفوذی میزبان کانی‌سازی (چهار نمونه)، کانسنگ مگنتیتی (سه نمونه) و بلورهای آپاتیت (پنج نمونه) استفاده شده است (جدول ۱). در شکل ۱۱-الف، الگوی عناصر نادر خاکی (REE) و عناصر کمیاب نسبت به گوشه‌های اولیه (McDonough and Sun, 1995) و در شکل ۱۱-ب (Boynton, 1984) به هنجار شده‌اند.

است، نمونه‌های مورد مطالعه دارای نسبت بالایی از Th/Yb می‌باشند و در قلمرو محیط‌های مرتبط با فرورانش در حاشیه فعال قاره‌ای قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-د).

### زمین‌شیمی عناصر نادر خاکی

به منظور مطالعه و بررسی روند و الگوی فراوانی عناصر کمیاب و نادر خاکی (REE) در کانسار غرب گلستان‌آباد، از نتایج آنالیز ژئوشیمیایی ۱۲ نمونه برداشت شده از توده‌های



شکل ۱۱. الف) نمودار عناصر کمیاب به هنجار شده نسبت به گوشه‌های اولیه (McDonough and Sun, 1995)، ب) نمودار فراوانی عناصر کمیاب خاکی به هنجار شده نسبت به کندریت (McDonough and Sun, 1995) برای نمونه‌های مگنتیت (Mag)، آپاتیت (Ap) و توده نفوذی میزبان کانی‌سازی (md) در کانسار غرب گلستان‌آباد

فراوانی و تغییرات عناصر نادر خاکی در سنگ میزبان کانی‌سازی (توده مونزوودیوریت-مونزوگابرو) و نمونه‌های مگنتیت و آپاتیت استخراج شده از کانسنگ‌ها، به نسبت مشابه هستند؛ با این تفاوت که مقادیر REE در توده مونزوودیوریت-مونزوگابروی به مراتب کمتر از فراوانی عناصر مورد اشاره در کانی‌های مگنتیت و آپاتیت هستند. به نظر فریتش و پردا (Frietsch and Perdahl, 1995) شباهت قابل توجه میان الگوی عناصر نادر خاکی موجود در مگنتیت با سنگ‌های دربرگیرنده آنها بیانگر منشأ مشترک آنها است.

به طوری که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مجموع فراوانی عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های آنالیز شده از کانی‌های آپاتیت بالا است و در محدوده ۰/۳۸ تا ۰/۶۴ درصد اندازه‌گیری شده است. فراوانی عناصر بیان شده در نمونه‌های مگنتیتی نیز در گسترده ۱۱۴ تا ۳۶۱ گرم در تن اندازه‌گیری شده است، که دو تا پنج برابر بالاتر از مجموع عناصر نادر خاکی در توده نفوذی میزبان می‌باشد.

لازم به ذکر است الگوی عناصر کمیاب خاکی کانسار غرب گلستان‌آباد و دیگر کانسارات منطقه زنجان، مشابه الگوی عناصر کمیاب خاکی کانسارات آهن ایران مرکزی است؛ از طرف دیگر، مقایسه الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی کانسارات اکسید آهن-آپاتیت منطقه زنجان (کردیان، Nabatian et al., 2012; Mokhtari et al., 2017; ۱۳۹۹) و غرب گلستان‌آباد با الگوی کانسارات آهن نوع کاپرونا در دیگر نقاط جهان نظیر کانسارات کاپرونا، رکتون و هنری (Frietsch and Perdahl, 1995) شباهت بین آنها را نشان می‌دهد.

## میانبارهای سیال

### نوع و ویژگی میانبارهای سیال

به منظور شناخت ماهیت فیزیکوشیمیایی و روند تحول سیال (سیالات) کانه‌ساز، از کانسنگ‌های آپاتیت‌دار کانسار غرب گلستان‌آباد، سه مقطع دورصیقلی تهیه و مطالعه شدند. مطالعات میانبارهای سیال بر روی کانی‌های آپاتیت، که به لحاظ روابط بافتی در همرشدی و همزمان با کانه‌های مگنتیت و اکتینولیت تشکیل شده‌اند، انجام

تهی شدگی Ti و Nb (شکل ۱۱-الف) از ویژگی‌های مگماهای کالک‌آلکالن مرتبط با کمان‌های آتشفشاری در مقایسه با مگماهای داخل صفحات لیتوسفری می‌باشد. آنومالی منفی Nb در بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شود و نشان دهنده مگماهای مرتبط به محیط‌های حاشیه فعال قاره‌ای است و نیز می‌تواند نشان دهنده آسودگی پوسته و سیالات آزاد شده از لیتوسفر فرورونده باشد (Aldanmaz et al., 2000). آنومالی مثبت Pb در نمونه‌های مورد مطالعه می‌تواند به متاسوماتیسم گوه گوشه‌ای توسعه سیالات ناشی از پوسته اقیانوسی فرورونده و یا آلایش مگما با سنگ‌های پوسته قاره‌ای مرتبط باشد (Kamber et al., 2002).

همراه بودن آنومالی مثبت Pb و آنومالی منفی Nb، نشانه مگماهای کمان‌های حاشیه قاره‌ای و مگماهای متاثر از پوسته قاره‌ای است (Hofmann, 1986). بررسی الگوی بهنجر شده عناصر نادر خاکی نشان می‌دهد همه نمونه‌ها به طور نسبی از عناصر نادر خاکی سبک (LREE) غنی و از عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) تهی شده‌اند. یکی از ویژگی‌های مهم نمونه‌های مورد مطالعه، روند تدریجی تهی شدگی از سمت عناصر کمیاب خاکی سبک به انواع سنگین و نبود تغییرات ناگهانی در شیب نمودارها است و از ویژگی شاخص مگماهای مرزهای صفحات همگرا (Guo et al., 2006) و سنگ‌های کالک‌آلکالن کمان حاشیه قاره‌ها است. یوروپیوم (Eu) مهمترین عنصر در گروه عناصر نادر خاکی است و بیشترین تغییرات را در این گروه نشان می‌دهد. این تغییر در فراوانی عنصر به دلیل شباهت و نزدیکی ظرفیت و شعاع یونی این عنصر به کلسیم است و جانشینی Eu به جای Ca را تسهیل می‌کند (Rollinson, 1993).

به نظر فریتش و پردا (Frietsch and Perdahl, 1995)، تهی شدگی Eu در کانسارات تیپ کاپرونا در اثر اکسیده بودن محیط (به دلیل وجود مگنتیت و هماتیت) و یا جانشینی Eu به جای Ca و Sr به دلیل تشابه شعاع یونی می‌باشد. همچنین کاهش یوروپیوم می‌تواند نشانگر تغییر ترکیب کانی‌شناسی از پلاژیوکلاز به سمت کانی‌های دگرسان شده‌ای همچون سریسیت باشد (Rollinson, 1993).

همان‌گونه که در شکل ۱۱-ب مشاهده می‌شود، الگوی

همگن شدگی در برابر شوری آمده است. نتایج حاصل از مطالعات میانبارهای سیال در کانسار غرب گلستان آباد، نشان می دهد مگنتیت و آپاتیت از نهشت سیالات کم شور تا شوری متوسط (۵/۸۶ تا ۲۱/۶۸ درصد وزنی معادل نمک طعام) با دمای ۳۴۷ تا ۵۴۷ درجه سانتی گراد ناشی شده اند. نمودار شوری در مقابل درجه همگن شدگی (شکل ۱۴) نشان می دهد کانی سازی از نهشت یک سیال گرمابی با دمای ۵۴۷ درجه سانتی گراد، که بتدریج سرد شده، حاصل شده است. این نمودار روندی از اختلاط یک سیال گرمابی (با منشاء ماقمایی) را با سیال دیگر با شوری و دمای پائین تر نشان می دهد و می تواند با ترکیبی از فرآیندهای رقیق شدگی و اختلاط سازگار باشد (Wilkinson, 2001). با مقایسه نتایج حاصل از مطالعه میانبارهای سیال در کانسار غرب گلستان آباد با انواع ذخایر معدنی، ویژگی های دمایی و شوری سیالات کانه ساز در این رخداد بیشترین شباهت را با سیالات مسئول کانی سازی در کانسارهای آهن-آپاتیت تیپ IOA (مشابه با کانسار کایرونا) نشان می دهند.

جمی و همکاران (2007) (Jami et al., 2007)، دلیران و همکاران (2010) (Daliran et al., 2010) و بنیادی و همکاران (Bonyadi et al., 2011) ذخایر اکسید آهن-آپاتیت ناحیه بافق را گرمابی معرفی کرده اند. جمی و همکاران (Jami et al., 2007)، با مطالعه میانبارهای سیال در انواع مختلف آپاتیت و نیز کوارتز در کانسار اسفورتی، مقدار دمای محلول را در مراحل اولیه بین ۳۷۵ تا ۴۲۵ درجه سانتی گراد با شوری ۱۴ تا ۱۸ درصد به دست آورده و به دمای ۱۴۵ تا ۱۵۵ درجه سانتی گراد و شوری کمتر از ۱۳ درصد در فازهای نهایی و تأخیری کاهش یافت. همچنین عزیزی و همکاران (Azizi et al., 2009) دمای محلول کانی ساز در ذخایر اکسید آهن-آپاتیت تشکیل شده در زون آذربایجان- البرز را تعیین کردن. براساس نباتیان و قادری (Nabatian and Ghaderi, 2013)، در کانسار سرخه دیزج نیز کانسنگ های اکسید آهن-آپاتیت از نهشت محلول های ماقمایی- گرمابی با دمای ۲۹۰ تا ۳۲۰ درجه سانتی گراد و شوری کمتر از ۲۲ درصد تشکیل شده اند.

پذیرفت. از لحاظ شکل ظاهری و با توجه به پارامترهای رودر (Roedder, 1984) و شپردد و همکاران (Shepherd et al., 1985)، میانبارهای سیال در نمونه های مورد مطالعه را می توان به ترتیب فراوانی به اشکال نامنظم، کروی و کشیده تقسیم بندی کرد. میانبارهای سیال در انواع دوفازی غنی از مایع (LV)، دوفازی غنی از گاز (VL)، تکفازی مایع (L) و تکفازی بخار (V) مشاهده شدند (شکل ۱۲). همچنین دو میانبار چهارفازی در اندازه های شش و هفت میکرون، متتشکل از حباب بخار+ مایع آبگین+ هالیت+ فاز جامد کدر (V+L+Ha+S) مشاهده شدند. فاز جامد تیره رنگ شناسایی شده در این میانبارها، شاید مگنتیت می باشد. در این مطالعه، تنها میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع (LV)، به لحاظ اولیه و درشت تر بودن مطالعه شدند. میانبارهای سیال دوفازی مورد مطالعه، ریز تا متوسط است و در اندازه های چهار تا ۳۵ میکرون مشاهده شدند. در این نوع از میانبارها، فاز مایع ۹۰ تا ۶۰ درصد و فاز بخار ۱۰ تا ۴۰ درصد حجم کل سیال را تشکیل داده است. این نوع میانبارها، اغلب با اشکال نامنظم و کمرت کروی شکل و کشیده در آپاتیت های میزان پراکنده اند (شکل ۱۲).

### ریزدماسنجی میانبارهای سیال

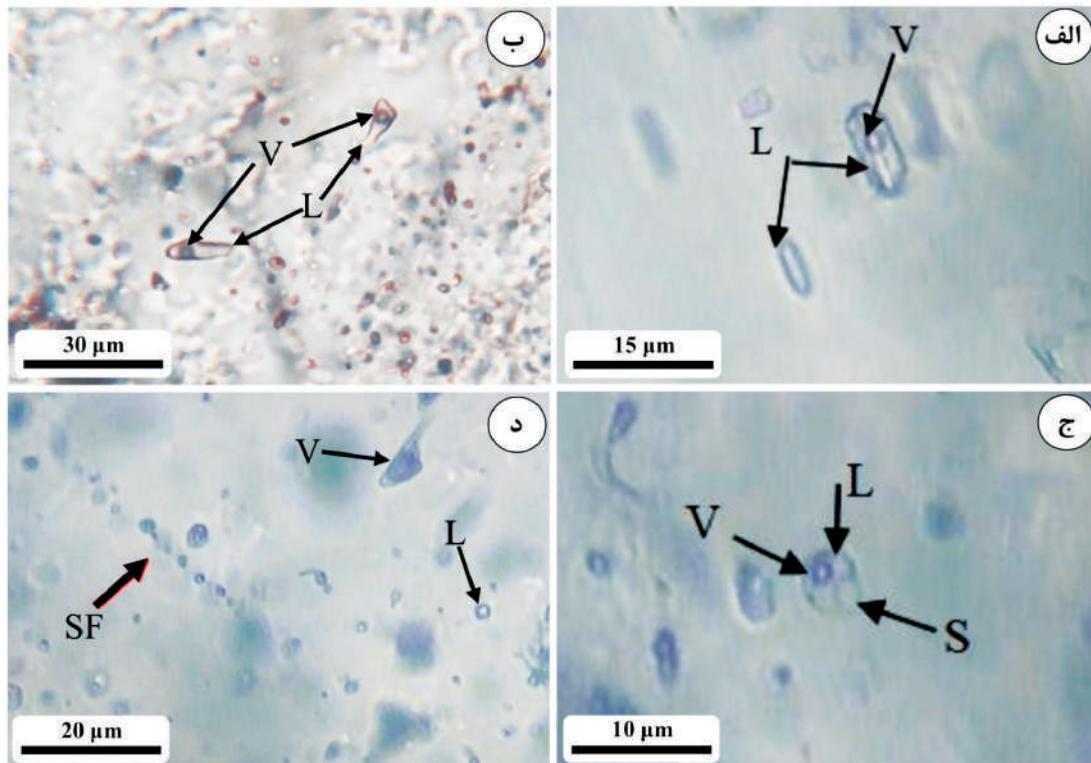
گستره دمای همگن شدگی برای میانبارهای سیال اولیه دوفازی مورد مطالعه از ۳۴۷ تا ۵۴۷ (میانگین ۴۲۵) درجه سانتی گراد اندازه گیری شده است (جدول ۲). در تمامی نمونه ها، همگن شدگی به فاز مایع صورت گرفت. گستره اولین نقطه ذوب یخ یا او تکتیک ( $T_c$ ) در نمونه های دوفازی در محدوده منفی چهار تا -۳۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری شد که نشان می دهد سیال کانه ساز، به صورت یک شورابه ساده تشکیل شده از NaCl نبوده، بلکه ممکن است علاوه بر سدیم، حاوی نمک های منیزیم، پتاسیم، کلسیم، آهن و منگنز نیز باشد. محدوده آخرین نقطه ذوب یخ ( $T_{mice}$ ) در نمونه های مذکور، از -۳/۶ تا -۱۹ درجه سانتی گراد ثبت شد و به ترتیب معادل شوری های ۵/۸۶ تا ۲۱/۶۸ معادل درصد وزنی NaCl هستند (جدول ۲ و شکل ۱۳).

در شکل ۱۴ روند تحول سیال کانه ساز در کانسار اکسید آهن-آپاتیت غرب گلستان آباد براساس نمودار تغییرات دمای

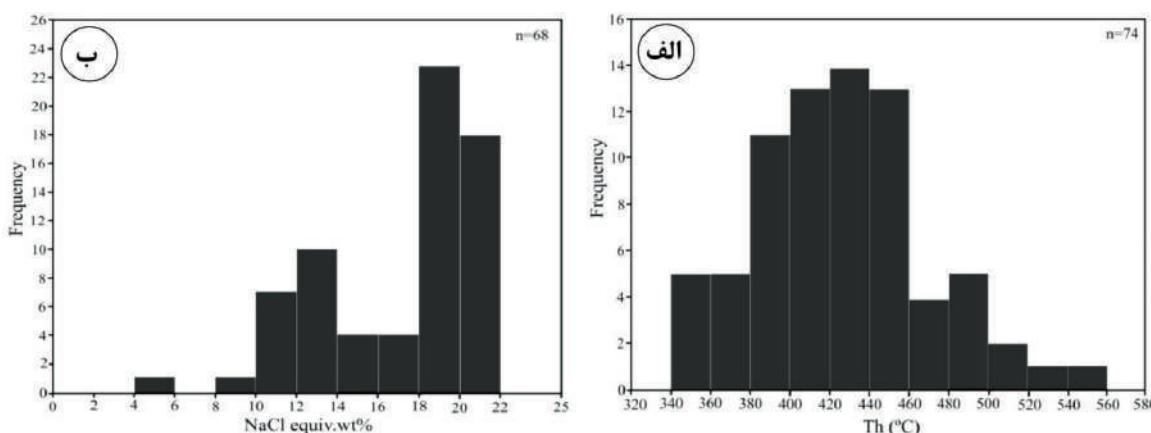
جدول ۲. خلاصه داده‌های مطالعات ریزدماسنجری میانبارهای سیال اولیه دوفازی (L+V) و سه‌فازی (L+V+S) در کانی آپاتیت در غرب گلستان‌آباد

Incl. type	Size ( $\mu\text{m}$ )	$T_e$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m\text{-ice}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_h$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Salinity (wt. % NaCl equiv.)	Mineral
L+V (n=72)	35-4	-620-21	-6-19-3	547-5347	86/5-68/21	Apatite
L+V+S (n=2)	7-6	-5/67-0/58	-5/30-28	405-372	47/38-42/32	Apatite

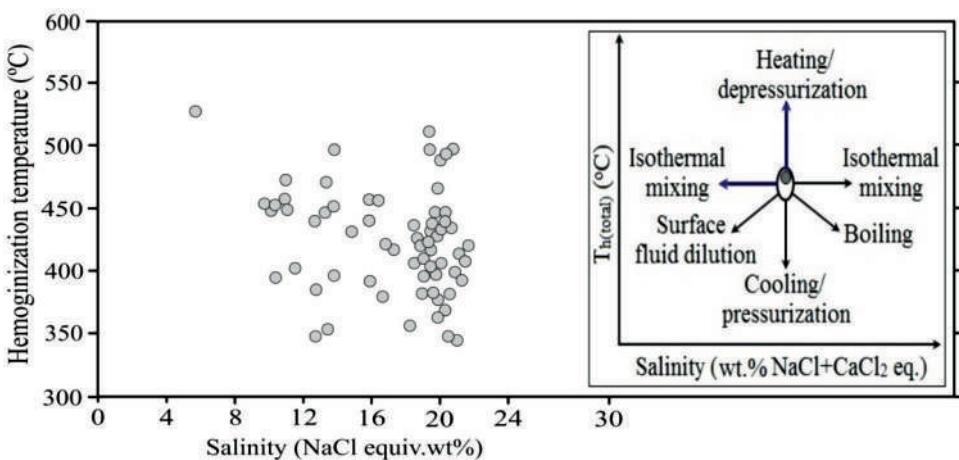
اعداد داخل پرانتز میان بیشترین فراوانی است.  $T_e$  = دمای اولین نقطه ذوب بخ و  $T_{m\text{-ice}}$  = دمای ذوب آخرین قطعه بخ و  $T_h$  = دمای همگن شدگی



شکل ۱۲. تصاویر میکروسکوپی (در دمای اتاق و نور عبوری با نیکول‌های موازی) از میانبارهای سیال مشاهده شده در بلورهای آپاتیت، الف، ب، ج) میانبارهای سیال اولیه دوفازی غنی از مایع (LV)، در تصاویر بیان شده، علاوه بر میانبارهای دوفازی، میانبارهای تکفازی مایع (L) و بخار (V) نیز قابل مشاهده هستند و د) رخداد میانبارهای تکفازی مایع (L) و غنی از بخار (V) و نیز میانبارهای ثانویه غنی از مایع (SF) در بلورهای آپاتیت



شکل ۱۳. الف) نمودار دمای همگن شدگی به فراوانی میانبارهای سیال، ب) نمودار درجه شوری به فراوانی میانبارهای سیال در کانی آپاتیت موجود در کانسار غرب گلستان‌آباد



شکل ۱۴. نمودار دوتایی دمای همگن‌شدنی نهایی در مقابل شوری برای داده‌های میانبارهای سیال در کانسار غرب گلستان آباد، روندها نشان‌دهنده فرآیند سردشدنی و اختلاط با آبهای سطحی است. نمودار شماتیک داخلی، بیانگر روندهای معمول میانبارهای سیال در فضای شوری-دمای همگن‌شدنی ناشی از فرآیندهای مختلف تحول سیال (Wilkinson, 2001) می‌باشد

## بحث

سیالات قابل حمل خواهد بود. هنگامی که سیالات کانه‌دار وارد محیط مناسب شوند، ترکیبات حمل شده را نهشت داده و کانسنگ‌ها را تشکیل می‌دهند (Gandhi and Bell, 1996).

انتقال سیالات غنی از آهن به سطح بالاتر در این تیپ از کانسارها، همزمان با تبلور توده نفوذی نیمه عمیق صورت گرفت.

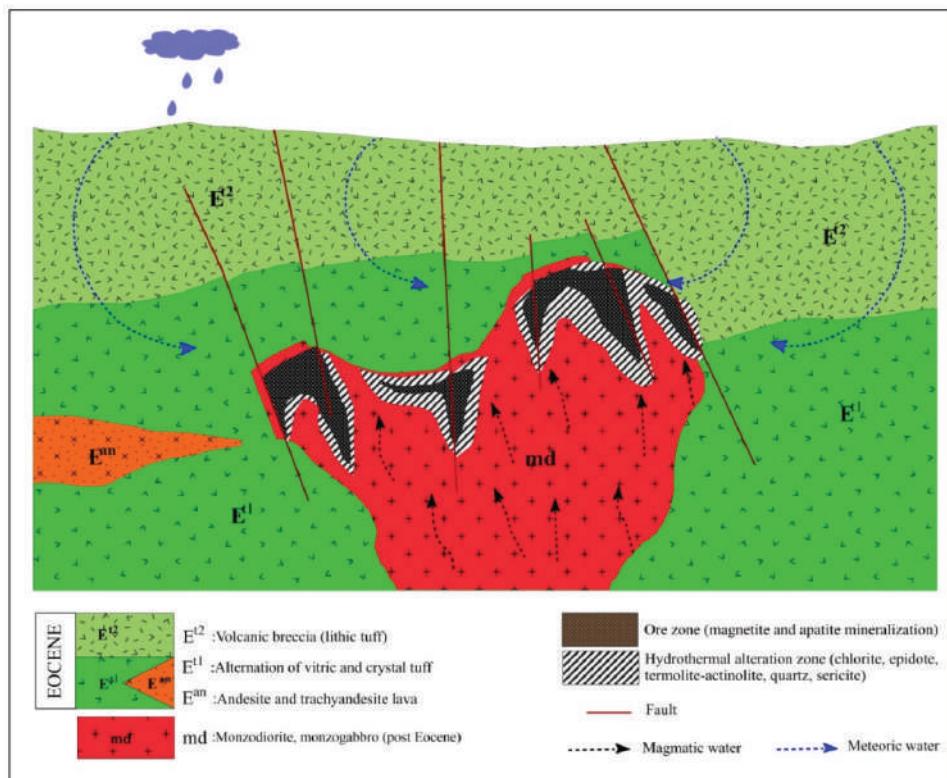
در مورد ژنز کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان آباد می‌توان اینگونه بیان کرد که توده نفوذی نیمه عمیق غنی از آهن، فسفر و عناصر نادر خاکی از طریق سامانه‌های گسلی موجود در گستره در بخش‌های نزدیک به سطح زمین، در اعماق کم جایگزین می‌شود. با تبلور کانی‌های سنگ‌ساز توده، ماغمایی گرانیت‌وئیدی باقی‌مانده غنی از سیالات و مواد فرار حاوی آهن و فسفر می‌شود، سیالات غنی از آپاتیت و مگنتیت به علت مقادیر بالای مواد فرار، فوگاسیته بالای اکسیژن و مقادیر بالای  $P_2O_5$  به سمت مناطق کم‌فشار حرکت کرده و در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌های توده‌های نفوذی نیمه عمیق، با فراهم آمدن شرایط تهنشین می‌شوند. این فرآیند به صورت کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت و با ساخت و بافت‌های رگه-رگچه‌ای، توده‌ای و دانه‌پراکنده در توده مونزو-دیوریت-مونزو-گابروی غرب گلستان آباد رخ داده است. عملکرد سیالات کانه‌ساز باعث دگرسانی کانی‌های تشکیل

مقایسه مهمترین ویژگی‌های کانسار اکسید آهن-آپاتیت غرب گلستان آباد (از جمله محیط تکتونیکی، ماهیت سنگ میزبان، دگرسانی‌های گرمایی، ژئوشیمی کانسنگ، کانی‌شناسی و میانبارهای سیال) با ویژگی‌های شاخص انواع تیپ‌های کانی‌سازی آهن در دنیا، حاکی از آن است، کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان آباد، بیشترین مشابهت را با کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت دار تیپ کایرونونا نشان می‌دهد و براساس رده‌بندی ویلیامز (Williams et al., 2005) در رده کانسارهای مگنتیت غنی از آپاتیت (IOA) قرار می‌گیرد. فرآیند تشکیل این گروه از ذخایر براساس تفریق ماغمایی و فعالیت‌های گرمایی و مشارکت سیالات جوی در مراحل پایانی تشکیل کانسار است (Gandhi and Bell, 1996).

کانی‌سازی در این تیپ کانسار، درون سنگ‌های آتشفسانی و نفوذی روی می‌دهد و اغلب فلزات موجود در این کانسارها منشأ ماغمایی دارند و سیالات غنی از مگنتیت نیز از سیالات ماغمایی غنی از اکسید آهن و آپاتیت با دمای بالا و در محیط‌های نیمه عمیق تشکیل می‌شوند (Gandhi and Bell, 1996). آپاتیت و اکتینولیت در این نوع از کانسارها از جمله کانی‌های همراه با مگنتیت هستند. فسفر در این کانسارها باعث پائین آمدن دمای انجماد مگنتیت در ماغما می‌شود و در این صورت، آهن در دمای پائین نیز توسط

مرحله آخر مربوط به پدیده سوپرژن است. در این مرحله، سولفیدهای اولیه اکسید شده‌اند و اثر چندانی از آنها باقی نمانده است. پدیده سوپرژن با تشکیل کالکوسيت، گوتیت و لیمونیت همراه است. در نهایت از مراحل مختلف تشکیل کانسار یک مدل شماتیک ارائه شده است (شکل ۱۵).

شده در مرحله قبل شده و بخشی از پیروکسن‌ها تبدیل به اکتینولیت شده‌اند. در مقاطع میکروسکوپی مطالعه شده، همراهی مگنتیت، آپاتیت و پیروکسن اکتینولیتی شده مشاهده شده است. با افزایش مقدار سولفور طی فاز تأخیری، کانه‌زایی سولفیدی صورت می‌گیرد و رگه‌رگچه‌های پیریت و مقدار جزئی کالکوپیریت در این مرحله تشکیل شده‌اند.



شکل ۱۵. مدل شماتیک از نحوه تشکیل کانسار غرب گلستان‌آباد

## نتیجه‌گیری

نزدیک به سطح زمین و در اعمق کم جایگزین می‌شود. با تبلور کانی‌های سنگ‌ساز توده، ماقمای باقی‌مانده، غنی از سیالات و مواد فرار حاوی آهن و فسفر می‌شود. سیالات غنی از آپاتیت و مگنتیت به علت مقادیر بالای مواد فرار، فوگاسیته بالای اکسیژن و مقادیر بالای  $P_2O_5$  به‌سمت مناطق کم فشار حرکت کرده و در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌های توده‌های نفوذی نیمه عمیق، با فراهم آمدن شرایط تهنشین می‌شوند. در این مرحله، کانی‌سازی آهن-آپاتیت و اکتینولیت با ساخت و بافت‌های رگه‌ای-رگچه‌ای، برشی، توده‌ای و دانه‌پراکنده تشکیل می‌شود. عملکرد

با توجه به مطالعات صحرایی، سنگ‌شناسی، سنگ‌نگاری، کانه‌نگاری و شواهد ژئوشیمیایی، کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد، شباهت نزدیکی با کانسارهای مگنتیت غنی از آپاتیت (IOA) دارد. سیالات غنی از مگنتیت، از سیالات ماقمایی غنی از اکسید آهن آپاتیت‌دار (تیپ کایرونوا) با دمای بالا و در محیط‌های نیمه عمیق تشکیل می‌شوند. آپاتیت و اکتینولیت در این نوع از کانسارها از جمله کانی‌هایی هستند که همراه مگنتیت می‌باشند. در کانسار آهن-آپاتیت گلستان‌آباد، توده مونزو‌دیوریت-مونزوگابروی غنی از آهن، فسفر و عناصر نادر خاکی، در بخش‌های

- دانشگاه تربیت مدرس، ۱۸۵. کردیان، ش.، ۱۳۹۹. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، زمین‌شیمی و منشأ کانسار اکسید آهن-آپاتیت گلستان‌آباد (خاور زنجان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، ۱۲۲.
- گروندی، ا.، ۱۴۰۰. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار اکسید آهن زرنان-شمال‌شرق زنجان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۲۲۱.
- مظہری، م.، ۱۳۹۸. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار آهن-آپاتیت‌دار علی‌آباد-مروارید، جنوب‌شرق زنجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۸۳.
- نباتیان، ق.، ۱۳۸۷. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار اکسید آهن آپاتیت‌دار سرخه‌دیزج، جنوب‌شرق زنجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۰۷.
- نباتیان، ق.، ۱۳۹۱. زمین‌شناسی، ژئوشیمی و تکامل کانسارهای اکسید آهن آپاتیت‌دار در کمریند آتش‌شانی-نفوذی طارم، البرز باختی، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، ۳۲۶.
- واقفی، س.ز.، ۱۴۰۲. ارتباط رخسارهای دگرسانی با کانه‌زایی در کانسارهای آهن ذاکر و اسکنده، شرق زنجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۹۶.
- Aldanmaz, E., Pearce, J.A., Thirlwall, M. and Mitchell, J.G., 2000. Petrogenetic evolution late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102, 67-95.
- Asiabahna, A. and Foden, J., 2012. Post-collisional transition from an extensional volcano-sedimentary basin to a continental arc in the Alborz Ranges, N-Iran. *Lithos*, 148, 98-111.
- Azizi, H., Mehrabi, B., Akbarpour, A., 2009. Genesis of tertiary magnetite-apatite deposits, southeast of Zanjan, Iran. *Resource Geology* 59(4), 330-341.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2), 210-265.
- Bonyadi, Z., Davidson, G.J., Mehrabi,

سیالات گرمابی باعث دگرسانی کانی‌های تشکیل‌شده در مرحله قبل شده و بخشی از پیروکسن‌ها تبدیل به اکتینولیت شده‌اند. براساس مطالعات میانبارهای سیال، دمای همگن‌شدگی سیالات مطالعه شده که به‌طور عمده از نوع دوفازی غنی از مایع است، در محدوده ۳۴۷ تا ۵۴۷ (با میانگین ۴۲۵) درجه سانتی‌گراد و شوری در محدوده ۵/۸۶ تا ۲۱/۶۸ معادل درصد وزنی NaCl اندازه‌گیری شده است. در مقاطع میکروسکوپی مطالعه شده، همراهی مگنتیت، آپاتیت و پیروکسن اکتینولیتی شده مشاهده شده است. با افزایش مقدار سولفور، طی فاز تأخیری، کانه‌زایی سولفیدی صورت می‌گیرد و رگه-رگچه‌های پیریت و مقدار جزئی کالکوپیریت در این مرحله تشکیل شده‌اند. پدیده سوپرژن با تشکیل کالکوسیت، گوتیت و لیمونیت همراه است.

## منابع

- آقانباتی، س.ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶.
- امینی، ب. و امینی چهرق، م.ر.، ۱۳۷۹. نقشه زمین‌شناسی طارم با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، بازنگری و استاندارد از نقشه هیرایاما و همکاران، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- خان‌محمدی، ن.، ۱۳۸۷. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار ذاکر (شمال‌شرق زنجان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، ۲۴۴.
- داوودی، ت.، ۱۳۹۸. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار آهن آراسو، شمال‌غرب قزوین. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۱۱.
- سالاروند، م.، ۱۳۹۸. مطالعات ایزوتوپی‌های پایدار گوگرد و میانبارهای سیال آپاتیت به‌منظور تعیین نحوه تشکیل کانسار آهن-آپاتیت سرخه‌دیزج، جنوب‌خاوری زنجان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۹۲.
- شرکت خدمات اکتشافی کشور، ۱۳۹۶. گزارش اکتشاف تفصیلی محدوده آهن گلستان‌آباد، ۷۶.
- صحتی قرامکی، س.، ۱۴۰۲. ژئوشیمی، دگرسانی و میانبارهای سیال در کانسار آهن گلستان‌آباد، شرق زنجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۱۸.
- عرب زوزنی، د.، ۱۳۹۹. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار آهن گلستان‌آباد، شمال‌شرق زنجان،

- B., Meffre, S. and Ghazban, F., 2011. Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se-Chahun iron oxide-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights from paragenesis and geochemistry. *Chemical Geology*, 281(3-4), 253-269.
- Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., Ed., *Rare Earth Element Geochemistry*, Elsevier, New York, 63-114.
  - Cox, K., Bell, J. and Pankhurst, R., 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*, George Allen and Unwin. London.
  - Daliran, F., Stosch, H.-G. and Williams, P., 2010. Lower Cambrian iron oxide apatite-REE (U) deposits of the Bafq district, east-central Iran, in Corriveau, L., Mumin, A.H., eds., *Exploring for iron oxide-copper-gold deposits: Canada and global analogues: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division Short Course Volume X*, 143-155.
  - Frietsch, R. and Perdahl, J.A., 1995. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types. *Ore Geology Reviews* 9, 489-510.
  - Gandhi, S.S. and Bell, R.T., 1996. Kiruna/Olympic Dam-type iron, copper, uranium, gold, silver; in geology of Canadian mineral deposit types, (ed.) O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair, and R.I. Thorpe; Geological Survey of Canada, *Geology of Canada*, no. 8, p. 513-522 (also Geological Survey of America, *The Geology of North America*, v. 1).
  - Guo, F., Fan, W. and Li, C., 2006. Geochemistry of late Mesozoic adakites from the Sulu belt, eastern China: Magma genesis and implications for crustal recycling beneath continental collisional orogens. *Geological Magazine* 143, 1-13.
  - Hall, D.L., Stern, S.M. and Bodnar, R.J., 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O solutions. *Economic Geology* 83, 197-202.
  - Hassanzadeh, J., Stockli, D.F., Horton, B.K., Axen, G.J., Stockli, L.D., Grove, M., Schmitt, A.K.. and Walker, J.D., 2008. U-Pb zircon geochronology of late Neoproterozoic-Early Cambrian granitoids in Iran: Implications for paleogeography, magmatism, and exhumation history of Iranian basement. *Tectonophysics* 451(1), 71-96.
  - Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A. and Mitchell, S.F., 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: Development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology* 48, 2341-2357.
  - Hirayama, K., Samimi, M., Zahedi, M. and Hushmandzadeh, A., 1966. Geology of the Tarom district, western part (Zanjan area, northwest Iran), with 1:100,000 map. Geological Survey of Iran, Tehran.
  - Hofmann, A.W., Jochum, K.P., Seufert, M. and White, W.M., 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution. *Earth and Planetary Science Letters* 79, 33-45.
  - Irvine, T. and Baragar, W., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8(5), 523-548.
  - Jami, M., Dunlop, A.C. and Cohen, D.R., 2007. Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran. *Economic Geology* 102, 1111-1128.
  - Kamber, B.S., Ewart, A., Collerson, K.D., Bruce, M.C. and McDonald, G.D., 2002. Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 144, 38-56.
  - Majidi, S.A., Omrani, J., Troll, V.R., Weis, F.A., Houshmandzadeh, A., Ashouri, E., Nezafati, N. and Chung, S.-L., 2021. Employing geochemistry and geochronology to unravel

- genesis and tectonic setting of iron oxide-apatite deposits of the Bafq-Saghand metallogenic belt, Central Iran. International Journal of Earth Sciences 110, 127-164.
- McDonough, W.F. and Sun, S.S., 1995. Composition of the Earth. Chemical Geology 120, 223-253.
  - Middlemost, E.A., 1994. Magmas and Magmatic Rocks: An Introduction to Igneous Petrology. Longman, London.
  - Mirnejad, H., Hassanzadeh, J., Cousens, B. and Taylor, B., 2010. Geochemical evidence for deep mantle melting and lithospheric delamination as the origin of the inland Damavand volcanic rocks of northern Iran. Journal of Volcanology and Geothermal Research 198(3), 288-296.
  - Mokhtari, M.A.A., Sadeghi, M. and Nabatian, G., 2017. Geochemistry and potential resource of rare earth element in the IOA deposits of Tarom area, NW Iran. Ore Geology Reviews 92, 529-541.
  - Mücke, A. and Younessi, R., 1994. Magnetite-apatite deposits (Kiruna-type) along the Sanandaj-Sirjan zone and in the Bafq area, Iran, associated with ultramafic and calc-alkaline rocks and carbonatites. Mineralogy and Petrology 50(4), 219-244.
  - Nabatian, G. and Ghaderi, M., 2013. Oxygen isotope and fluid inclusion study of the Sorkhe-Dizaj iron oxide-apatite deposit, NW Iran. International Geology Review 55(4), 397-410.
  - Nabatian, G., Ghaderi, M., Daliran, F. and Rashidnejad Omran, N., 2012. Sorkhe-Dizaj iron oxide-apatite ore deposit in the Cenozoic Alborz-Azerbaijan magmatic belt, NW Iran. Resource Geology 63(1), 42-56.
  - Nabatian, G., Rastad, E., Neubauer, F., Honarmand, M. and Ghaderi, M., 2015. Iron and Fe-Mn mineralisation in Iran: Implications for Tethyan metallogeny. Australian Journal of Earth Sciences 62(2), 211-241.
  - Pearce, J.A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. Lithos 100, 14-48.
  - Rahimi, E., Maghsoudi, A. and Hezarkhani, A., 2016. Geochemical investigation and statistical analysis on rare earth elements in Lakehisiyah deposit, Bafq district. Journal of African Earth Sciences, 124, 139-150
  - Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy 12, 644 .
  - Rollinson, H.R., 1993. Using geochemical data, evaluation, presentation, interpretation" Longman Scientific and Technical, 352 .
  - Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies. Blackie, Glasgow, 239 .
  - Stern, S.M., Hall, D.L. and Bodnar, R.J., 1988. Synthetic fluid inclusions V: solubility relations in the system NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O under vaporsaturated conditions. Geochemica et Cosmochimica Acta 52(5), 989-1005.
  - Stöcklin, J. and Eftekhrnezhad, J., 1969. Geological map of Zanjan, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
  - Thompson, R.N., 1982. Magmatism of the British Tertiary volcanic province. Scottish Journal of Geology 18(1), 49-107.
  - Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist 95(1), 185-187.
  - Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. Lithos 55, 229-272.
  - Williams, P. J., Barton, M. D., Johnson, D. A., Fontboté, L., De Haller, A., Mark, G., Oliver N, H. S. and Marschik, R., 2005. Iron oxide coppergold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin. Economic Geology, 371-405.



# شیمی کانی و ژئوشیمی عناصر جزئی/نادرخاکی در الترامافیک‌های غرب ماکو

منیر مجرد<sup>(۱)</sup>\*

۱. دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۸

## چکیده

سنگ‌های الترامافیک کرتاسه فوقانی در ناحیه غرب ماکو در نزدیکی موز با ترکیه متعلق به افیولیت نئوتیس و به صورت توده‌های کوچک و پراکنده، توزیع وسیعی دارند. این بخش از خاک ایران بخشی از بلوک ارمنستان جنوبی و گندوانایی و نزدیک به خطواره سیوان-آکرا است. در این مطالعه با استفاده از مشاهده دقیق روابط صحرایی، بررسی شیمی بلور و داده‌های سنگ‌کل که شامل عناصر جزئی و نادرخاکی است، به طبقه‌بندی این گروه سنگی، شناسایی ترکیب فازهای باقیمانده و تشخیص جایگاه تشکیل سنگ گوشه‌های پرداخته شده است. سنگ‌های الترامافیک این ناحیه به شدت سرپانتینی شده، کم کلسیم و هیدراته هستند. بنابراین اندازه‌گیری گوشه‌های درجه بالایی از ذوب بخشی را تجربه کرده و از عناصر ناسازگار تهی هستند. بنابراین اندازه‌گیری مقادیر این عناصر با روش خاصی صورت گرفت. فازهای اصلی شامل فورستریت، انساتیت، دیوپسید و کروم اسپینل است و در یک متن غالب سرپانتینی از نوع کریزوتیل و لیزاردیت قرار دارند. الگوی عناصر نادرخاکی سنگ‌ها زنگولهای است و نشانه‌ی آلایش با پوسه قاره‌ای را ثبت کرده است. بعلاوه سنگ‌های الترامافیک غرب ماکو بر اساس ژئوشیمی سنگ‌کل و با استفاده از نمودارها و نسبت‌های بین اکسید عناصر اصلی و جزئی، از دسته سرپانتینیت‌های فرورانده شده ارزیابی شده و درجات بالایی از باروری مجدد آنها توسط فرایندهای تبادل سنگ/سیال روی داده است. بنابراین فراوانی نسبی بالای عناصر محلول در سیال مانند اورانیم، سرب و استرانسیم در آنها حاصل فرایندهای ثانوی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** افیولیت، الگوی عناصر نادرخاکی، سرپانتینیت، شیمی بلور، ماکو.

## مقدمه

اقیانوسی قدیمی و موقعیت آن از لحاظ چرخه ویلسون در اختیار قرار می‌دهد (Uysal et al., 2015; Pearce and Robinson, 2010) افیولیت‌ها نشان داده است، اغلب سنگ‌های الترامافیک اقیانوسی در محیط جلوی قوس پدید آمده‌اند

مطالعه بخش گوشه‌های یک افیولیت می‌تواند اطلاعات مفیدی را درباره فرایندهای تکوین گوشه‌های فوقانی و محیط تکتونیکی پیدا کند (Uysal et al., 2008). افیولیت‌های مرتبط با جایگاه فرافروزانشی<sup>1</sup> یا جلوی قوسی<sup>2</sup> اغلب دانشی درباره تاریخچه تحولات لیتوسفر

1. Supra Subduction Zone (SSZ)

2. Fore-arc

\* نویسنده مرتبط: m.modjarrad@urmia.ac.ir

۱۳۹۸، نیکبخت و همکاران، ۱۳۹۹).

در مطالعه حاضر بر روی یک مجموعه نمونه جدید از سرپیانتینیت‌های پراکنده غرب ماکو تحقیقات مربوط به شیمی بلور و نیز ترکیب سنگ کل سامان یافته و مهمتر از همه با تکنیک ویژه‌ای مقادیر بسیار انداز عناصر جزئی و نادر خاکی آن که نقش تعیین‌کننده‌ای در مطالعه پترولوزی دارد، به دشواری سنجیده و بررسی شده است. شواهد حاکی از این است که ناحیه ماکو قطعه‌ای از بلوک ارمنستان جنوبی و گندوانیک بوده (Nikogosian et al., 2023) و بیشتر به خطواره نئوتیس شمالی نزدیک می‌باشد. در بخش شمال غربی ایران پیچیدگی این فرایندها بیشتر بوده است (شکل ۱) و بیشتر لکه‌ها در امتداد گسل تراستی مهم موسوم به سیه‌چشم (چالدران)-خوی-تبریز به سطح رسیده‌اند (Mohammadi et al., 2020).

### زمین‌شناسی ناحیه

سنگ‌های الترامافیک سرپیانتینی شده افیولیتی در غرب ماکو به صورت توده‌های کوچک و پر تعداد در این ناحیه تا مرز بین ایران و ترکیه به همراه سنگ‌های متابازیتی با منشاء پشتۀ میان اقیانوسی (Modjarrad et al., 2024b) و بازلت‌های جوان کواترنری ماکو (مجرد، ۱۴۰۱) سطح را پوشانده‌اند. البته درجه دگرگونی در سنگ‌های این ناحیه به‌اندازه بخش‌های شمالی در استپاناوان و آماسیا (Rolland et al., 2020) نیست. از آنجا که محصولات آتش‌شسانی طغیانی پلداشت تا ماکو با ترکیب مشابه آتش‌شسان آرارات بخش وسیعی از ناحیه را با سنگ‌های آندزیتی- توف و بازالت حفره‌دار جوان پوشانده‌اند. بنابراین رخنمون سنگ‌های الترامافیک در سطح کوچک و به صورت پراکنده است. همچنین سنگ‌های الترامافیک توسط رسوب‌گذاری آهک‌های پلازیک پالتوسون نیز محفوظ شده و از دید پنهان هستند.

این ناحیه در خطواره افیولیتی نئوتیس به صورت آمیزه رنگین تکتونیزه در کرتاسه فوکانی پدید آمده (آقانباتی،

Xin et al., 2021; Dilek and Furnes, 2014).

طبق یافته‌های نوین، افیولیت‌های جلوی قوسی بخشی از پوسته اقیانوسی هستند و در مراحل آغازین فرورانش ایجاد شده است (Whattam and Stern, 2011). این دسته از افیولیت‌ها اغلب به شکل یک آمیزه رنگین در سطح ظاهر می‌شوند (Wakabayashi, 2017).

در گوشه شمال غربی ایران فشارش مورب ورقه عربی به زیر خرد قاره ایران و بلوک ارمنستان جنوبی<sup>۱</sup> طی فرورانش نئوتیس با شبی به سمت شمال شرقی در زمان تریاس تا ژوراسیک زیرین (Zhang et al., 2018) منجر به پیدایش قوس ماقمایی سنوزئیک مشهور به نام ارومیه-دختر<sup>۲</sup> با نام معادل کمریند ماقمایی ترکیه-فقاقد-کوچک-ایران<sup>۳</sup> شده است (Grosjean et al., 2022). این کمریند به موازات نوار دگرگونه سندج-سیرجان و نیز لکه‌های افیولیتی متعدد امتداد کوهزاری زاگرس<sup>۴</sup> از زمان ژوراسیک میانی تا برخورد عربی-اوراسیایی ظهرور پیدا کرده است (Berberian and

King, 1981; Mohajjal and Fergusson, 2000) برخی زمین‌شناسان معتقدند نئوتیس شامل دو شاخه شمالی (خطواره سیوان-آکرا) و جنوبی (خطواره بیتلیس-زاگرس<sup>۵</sup>) بوده و شاخه شمالی دیرتر از شاخه جنوبی و در میوسن میانی بسته شده است (Neill et al., 2013). لکه‌های افیولیتی متعدد کمریند افیولیتی زاگرس متعلق به کرتاسه بالایی و ناشی از پدیده‌های مربوط به بسته شدن اقیانوس نئوتیس جنوبی هستند. لکه‌های افیولیتی از شمال تا جنوب در ارمنستان، شرق ترکیه، شمال غرب ایران و شمال شرق عراق در سطح رخنمون پیدا کرده‌اند و مهمترین آنها عبارتند از: آماسیا، استپاناوان، سیوان و ودی در ارمنستان، کاگیزمان، چادیران، تاشلیچای و شرق وان در ترکیه، آوجیق، چالدران، خوی، سرو، گیسیان، پیرانشهر، سرداشت، مربیان، کامیاران و کرمانشاه در ایران و حسن بگ، پشتاشان، بولفات، ماوات و پنجوین در عراق (Modjarrad et al., 2024a and references therein; Modjarrad et al., 2025) یک افیولیت در شناخت وقایع و منشاء آن کارآیی زیادی دارد (مجرد و مؤید، ۱۴۰۳، جلالت و کیل‌کنندی و همکاران،

1. South Armenian Block (SAB)

2. Urmia-Dokhtar magmatic arc (UDMA)

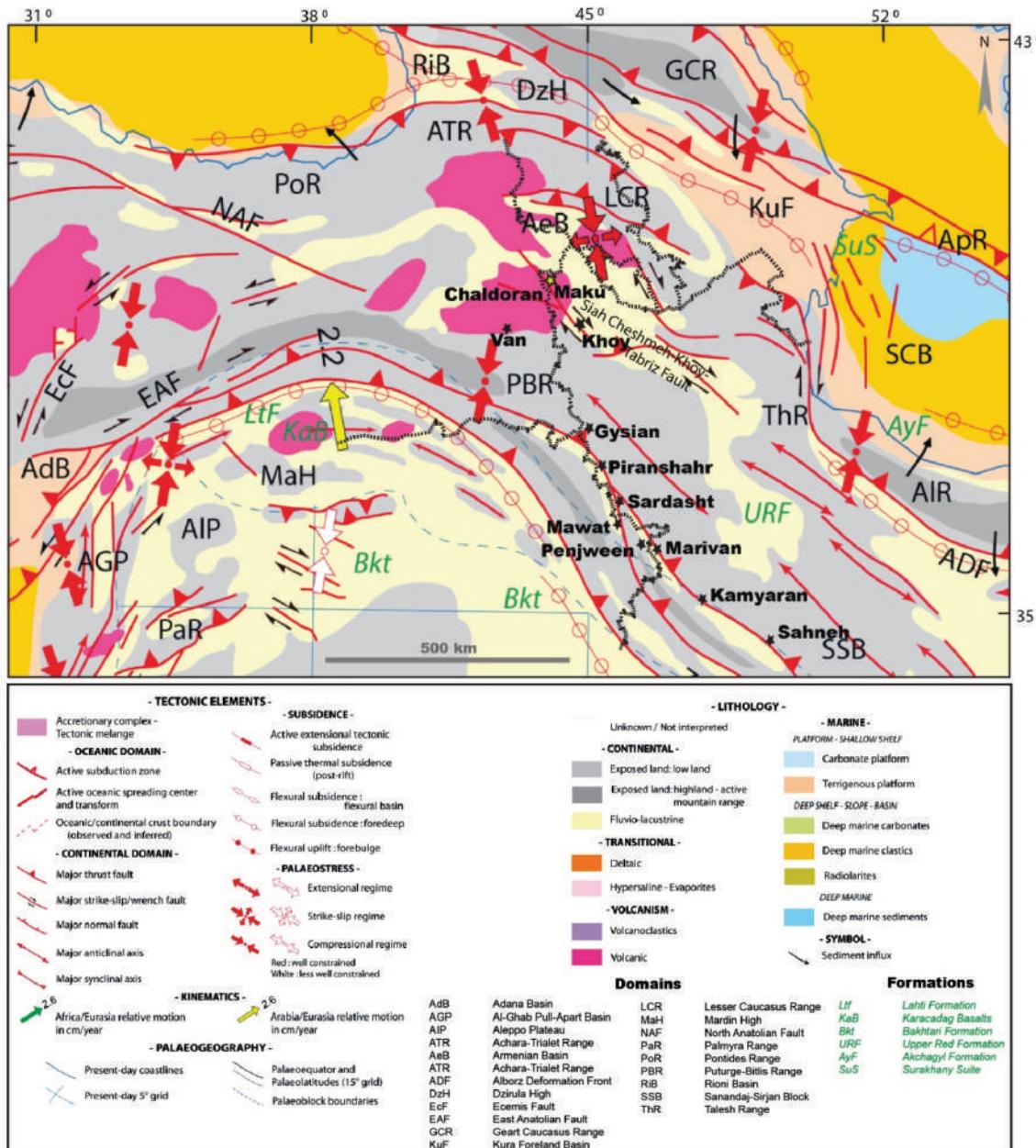
3. Turkish-Lesser Caucasian-Iranian magmatic belt

4. Zagros Orogenic (ophiolitic) belt (ZOB)

5. Bitlis-Zagros

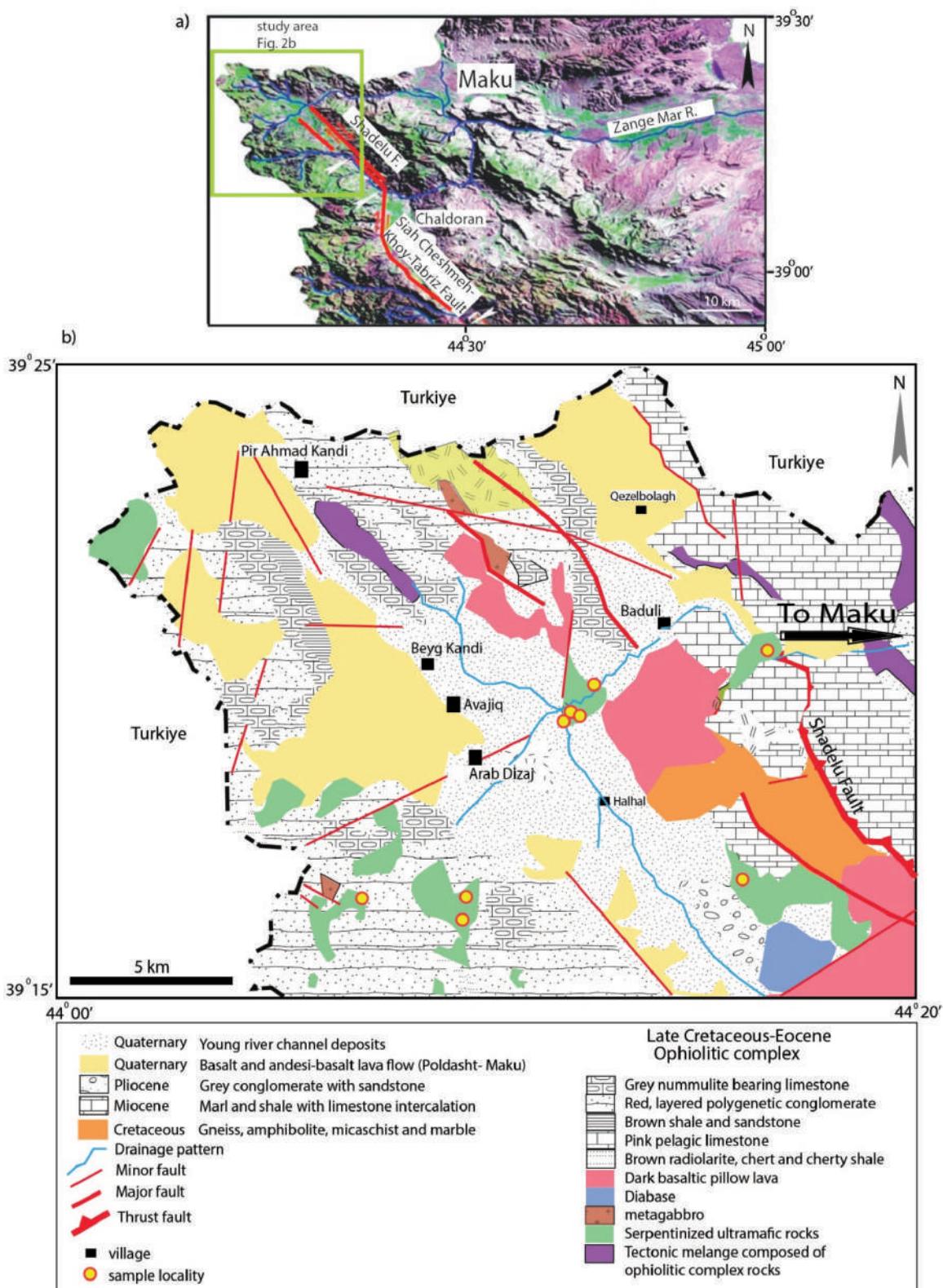
در اطراف روستاهای علوجنی، هال‌هال، دلیک‌وردی و شاه بندله‌لو است و نمونه‌برداری از این مناطق صورت گرفت (شکل ۲-۶).

(۱۳۸۳) و در امتداد گسل اصلی امتدادلغز سیه‌چشمیه (چالدران)-خوی-تبریز (روستایی و همکاران، ۱۳۹۳) و گسل‌های تراستی نظیر شادلو (شکل ۲-۶) در سطح ظاهر شده است (Berberian, 1997). بیشتر تمکز سرپاپتینیت‌ها



شکل ۱. نقشه کهن ساختاری خطواره نئوتیس در زمان ۳/۶ تا ۲/۵۹ میلیون سال قبل<sup>۲</sup> اقتباس شده از نقشه شماره ۱۴ برنامه تکامل حوضه خاورمیانه<sup>۳</sup> (Barrier and Vrielynck, 2008).

1. Palaeotectonic map
2. The Piacenzian time
3. Middle East Basins evolution Programme (MEBE)



شکل ۲. a) موقعیت جغرافیایی ناحیه مورد مطالعه بر روی عکس ماهواره‌ای شمال غرب ایران. گسل اصلی امتداد‌لغزی که بروند لکه‌ها در امتداد آن است، مشخص شده است. b) نقشه زمین‌شناسی ناحیه غربی ماکو (اقتباس شده و تغییر بافته بر روی ورقه ۱:۱۰۰۰۰ سیه‌چشمۀ از مجیدی، ۱۳۸۵) و توزیع لکه‌های الترامافیکی بر روی آن، همچنین محل نمونه‌برداری‌ها بر روی نقشه علامت‌گذاری شده است.

## پتروگرافی و شیمی کانی‌ها

## روش مطالعه

سنگ‌های الترامافیک پراکنده در ناحیه غربی ماکو اغلب بهشدت (بیش از ۷۰ درصد) سرپانتینی شده‌اند و فقط بقایایی از الیوین، پیروکسن‌ها و اسپینل در زمینه‌ای از سرپانتین وجود دارد (شکل ۳). بنابراین استفاده از پسوند سرپانتینی برای این سنگ‌ها الزامی است. با توجه به نسبت فراوانی حجمی فازهای باقیمانده این سنگ‌ها از نوع هارزبورزیت سرپانتینی می‌باشد.

الیوین در این سنگ‌ها از نوع فورسترتیتی است و حدود ۲۰-۱۰ درصد حجمی فراوانی دارد. این کانی بافت غربالی داشته و به صورت جزایری باقیمانده در متن سرپانتین‌های رشته‌ای و توده‌ای لیزاردیتی، کریزوتیلی منیزیم بالا نمود دارد.

ارتوبیروکسن از نوع انستابیت با فراوانی حدود ۱۰ درصد حجمی و کلینوبیروکسن دیوپسیدی بسیار کمتر (حدود ۵ درصد حجمی) در این سنگ‌ها وجود دارند. گاهی بافت نبود امتزاجی از دو پیروکسن در نمونه‌ها دیده می‌شود. ولی اغلب این دو کانی به صورت فازهای مجرأ رشد کرداند. کانی تیره از نوع کروم اسپینل به صورت شکسته و تکه تکه شده در ابعاد ریز هم دیده می‌شود. در بعضی نمونه‌ها کانی کلینوبیروکسن ثانویه رشد کرده و نمی‌توان آن را جزء کانی‌های اصلی قلمداد و در طبقه‌بندی سنگ لحاظ کرد. خلاصه‌ای از نتایج بررسی شیمی کانی‌ها بر روی عکس‌های میکروسکوپ الکترونی درج شده تا مطالعه و مقایسه آسان‌تر شود (شکل ۳).

## ژئوشیمی سنگ کل

به‌منظور درک شرایط تشکیل و نیز ویژگی‌های ژئوشیمیابی سنگ‌های الترامافیک سرپانتینی غرب ماکو اقدام به تجزیه سنگ کل نمونه‌ها شد (جدول ۱). این نتایج نشان داد سنگ‌های مورد نظر هیدراته و فقیر از کلسیم بوده و با ترکیب نورماتیو بازمحاسیه شده متعلق به دسته هارزبورزیت و/یا الیوین-ارتوبیروکسنیت کلینوبیروکسن دار

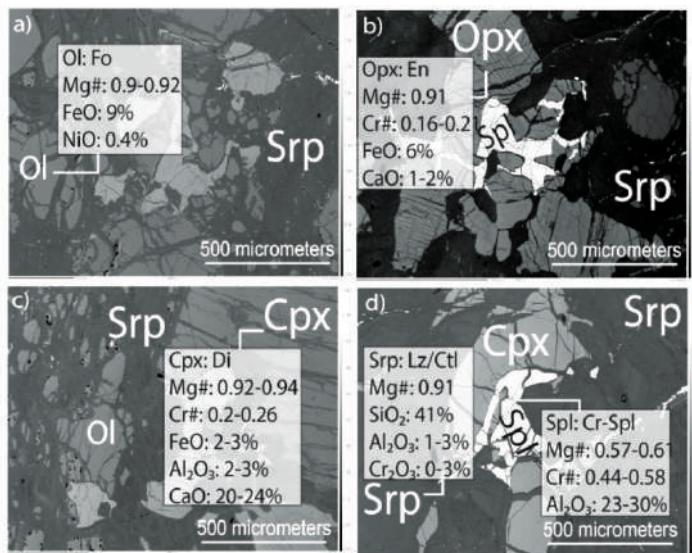
از بین ده‌ها نمونه سنگی از سرپانتینیت‌های پراکنده در غرب ماکو تعداد ۲۰ نمونه برای تهیه مقطع نازک انتخاب و توسط میکروسکوپ پلاریزان در گروه زمین‌شناسی دانشگاه ارومیه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. پس از آن هشت نمونه از متنوع‌ترین نمونه‌ها از نظر کانی‌شناسی و بافتی که توزیع جغرافیایی مناسبی از ناحیه داشتند، برای تجزیه به‌وسیله دستگاه فلوئورسانس اشعه ایکس<sup>۱</sup> (برای دستیابی به اکسید عناصر اصلی) و طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفتیده القائی<sup>۲</sup> (برای اندازه‌گیری عناصر جزئی و نادر خاکی) در آزمایشگاه ساوآرما (معتمد وزارت صمت در تهران) تجزیه شد (جدول ۱S نتایج را نشان می‌دهد). از آنجاکه سنگ‌ها بسیار تهی شده بودند اغلب عناصر جزئی، همه عناصر نادر خاکی و نیز کل گروه پلاتین که با صرف هزینه بالا مورد تجزیه قرار گرفتند، زیر حد تشخیص دستگاه گزارش شد. با عنایت به اینکه فراوانی برخی عناصر جزئی و نیز الگوی عناصر نادر خاکی در تعیین خاستگاه و بررسی سیر تکاملی پوسته نقش حیاتی دارند بنابراین چهار نمونه متنوع از نظر اکسید عناصر اصلی انتخاب و در آزمایشگاه GeoLab انتاریو (وزارت معدن کانادا) مورد تجزیه قرار گرفت (جدول 2S). در این تجزیه به صورت ویژه حد تشخیص دستگاه تا حد دهزارم پی‌پی ام پایین آورده شد تا غلظت بسیار اندک عناصر پس از تغليظ در اسید مرکب سنجیده شود. مجموع تمام عناصر نادر خاکی در این سنگ‌ها به سختی به دو پی‌پی ام می‌رسد و نشان از تهی شدگی شدید آنها دارد. استانداردهای مورد استفاده پیروکسنتیت ISO 17025 و نیز 684 OREAS برای کالیبراسیون دستگاه است.

پس از پتروگرافی دقیق و نیز بررسی نتایج ژئوشیمی تعداد چهار نمونه برای انجام تجزیه نقطه‌ای ریزکاونده الکترونی<sup>۳</sup> در آزمایشگاه گروه علوم زمین دانشگاه لودویگ ماکسی میلیان مونیخ در کشور آلمان انتخاب شد. دستگاه از نوع کامکا SX-100 و کانی‌های اصلی نظریه الیوین، پیروکسن، اسپینل و سرپانتین در سنگ‌های مورد بحث مورد تجزیه قرار گرفتند. جدول 3S نتایج این تجزیه را خلاصه کرده است.

1. XRF

2. ICP-MS

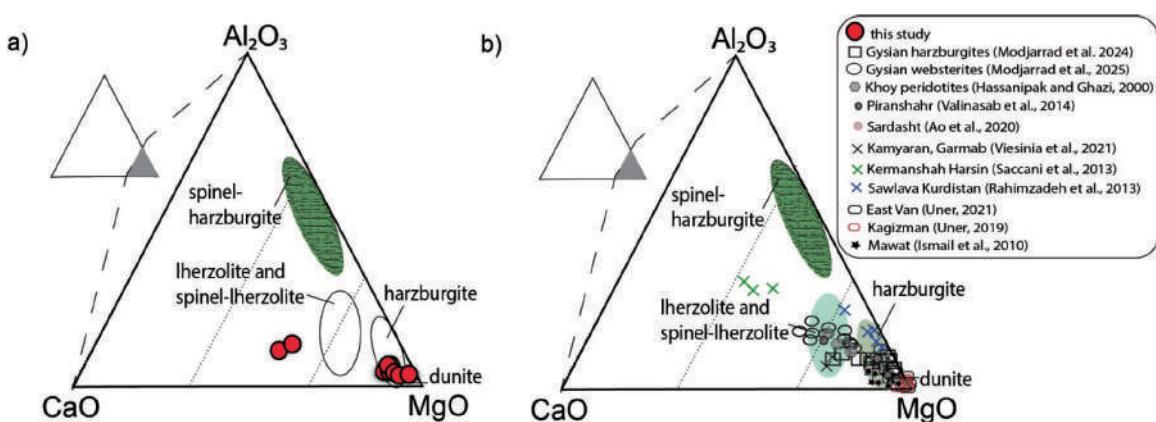
3. Electron Prob Micro Analyser (EPMA)



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های سریانتینی غرب ماکو. خلاصه‌ای از نتایج شیمی بلور روی عکس‌ها قید شده است. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از Whitney and Evans (2010) می‌باشد

سنگ‌های مورد مطالعه اغلب در گستره هارزبورژیت و کمتر در بخش لرزولیت گوشه‌ای واقع شده‌اند (شکل ۴-a). با هدف قیاس الترامافیک‌های غرب ماکو با سایر افیولیت‌های شناخته شده امتداد نئوتیس، برخی از موارد مهم در همین نمودار مشخص و تشابه موارد متعددی از آنها نظیر غرب وان ترکیه، خوی، کرمانشاه و پنجوین عراق با الترامافیک‌های حاضر تأیید می‌شود (شکل ۴-b). البته بعضی از آنها بیشتر لرزولیتی هستند و یا بیشتر دگرگون شده و منیزیم از دست داده‌اند.

می‌باشند. این سنگ‌ها محتوای بالایی از مواد فرار داشته (LOI=12-15 wt.%) و بهشت سریانتینی شده‌اند. محتوای بالای اکسید منیزیم (حدود ۴۵-۳۰ درصد) از ویژگی‌های سنگ‌های الترامافیک گوشه‌های محسوب می‌شود (Pfeifer, 1990). میزان اندک اکسیدهای آلومینیم و کلسیم ناشی از حضور کم فاز کلینوپیروکسن به دلیل نرخ بالای ذوب بخشی در این تقاهه گوشه‌ای است. در نمونه‌هایی که کلینوپیروکسن ثانویه به صورت متاسomatیک در آنها پدید آمده این دو اکسید فراوانی بیشتری دارند. در نمودار مثلثی اکسیدهای آلومینیم-کلسیم-منیزیم



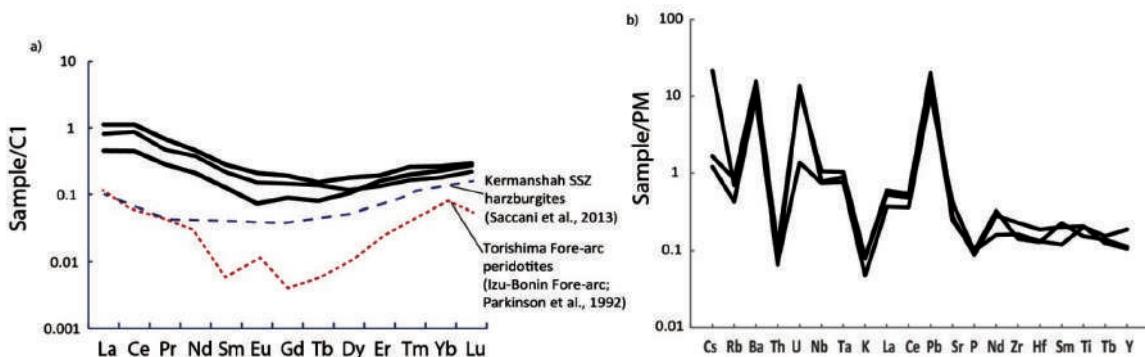
شکل ۴. (a) رابطه بین سریانتینیت‌های غرب ماکو و پروتوپلیت آن در مثلث (Li et al., 2004) MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO (wt.%)، (b) همین نمودار برای سریانتینیت‌های مهم نئوتیس رسم شده است

دیده می‌شود. با هدف مقایسه، دو مورد الگوی مربوط به الترامافیک‌های جلوی قوسی از ناحیه بونین و کرمانشاه در این نمودار آورده شده که تشابه قابل ملاحظه‌ای با روندهای نمونه‌های غرب ماکو نشان می‌دهند.

همچنین رسم الگوی تغییرات عنکبوتی نمودارهای چندین عنصری به هنجار شده نسبت به گوشته اولیه، بی‌هنگاری مثبتی از باریم، اورانیم، سرب و استرانسیم در کنار بی‌هنگاری منفی نسبی از توریم، پتاسیم، فسفر و بیشتر عناصر با مقاومت یونی بالا مانند زیرکونیم و نئودمیم را نشان می‌دهد (شکل ۵-۵).

با توجه به شدت سریانتینی شدن الترامافیک‌های غرب ماکو، فراوانی عناصر جزئی برای تعیین ژنز آنها می‌تواند بسیار ارزشمند باشد. فراوانی کروم بین ۲۸۵۰-۲۰۰۰، نیکل از ۱۷۰۰-۲۰۶۰، اسکاندیم بین ۱۰-۲۰، تیتانیم ۱۰۰-۲۰۰، باریم ۳۵۰-۸۰، لیتیم ۲-۹ و سرب زیر سه پی بی ام می‌باشد (جدول ۲S).

برای رسم الگوی عناصر نادر خاکی این سنگ‌ها از کندریت برای به هنجارسازی استفاده شد (شکل ۵-a). این الگو یک شکل زنگوله‌ای داشته و هم عناصر نادر خاکی سبک و هم سنگین بالا و مقادیر عناصر میانه گروه کم است. بی‌هنگاری منفی خفیفی از یوروپیم در این الگو



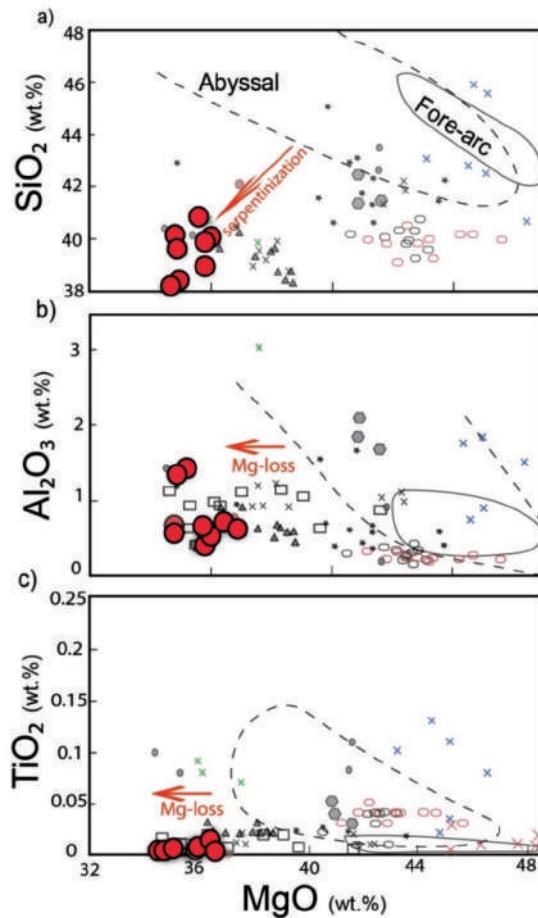
شکل ۵. (a) الگوی عناصر نادر خاکی به هنجار شده نسبت به کندریت (Taylor and McLennan, 1985)، بعلاوه دو روند از سریانتینیت‌های جلوی قوس با هدف قیاس آورده شده است. منابع روی نمودار درج شده است، (b) نمودار عنکبوتی چندین عنصری به هنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989).

## بحث

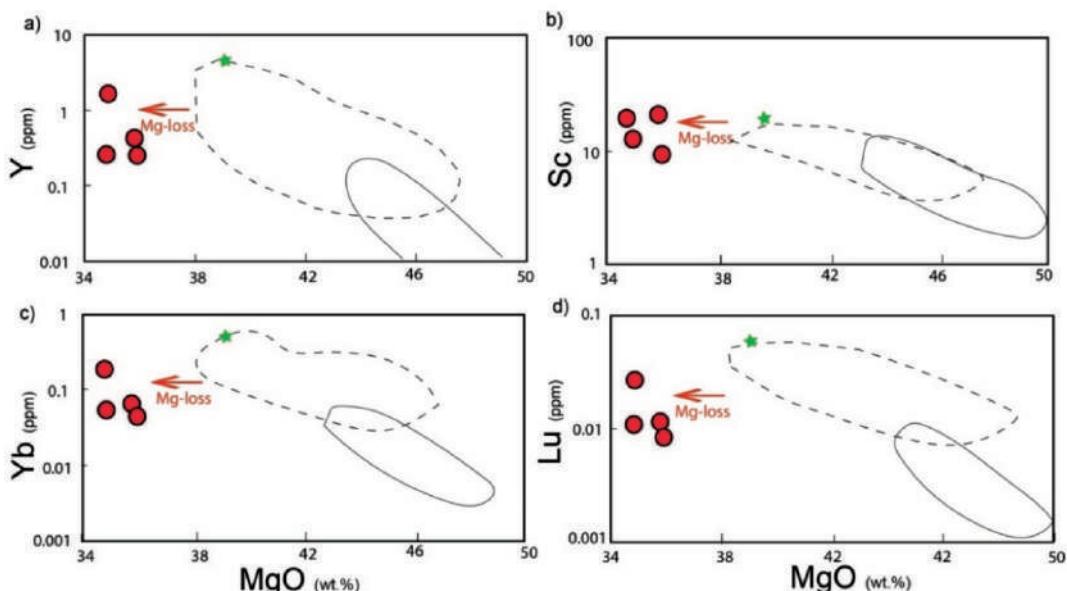
این مشخصه را خوب نشان می‌دهند. بقیه الترامافیک‌های مقایسه شده نئوتیتیس نیز اغلب در جایگاه‌های تعیین شده استقرار نیافته و درجاتی از سریانتینی شدن مانع از تعیین دقیق جایگاه تشکیل آنها می‌شود (شکل ۶).

با هدف طبقه‌بندی سریانتینیت‌های غرب ماکو (جدول ۱) طبق دسته‌بندی دشامپ و همکاران (Deschamps, et al., 2013) نمودارهایی بر پایه ایتریم در برابر استرانسیم، لیتیم، اورانیم، تیتانیم، باریم، سرب و نسبت لانتانیم به ایتریم رسم شد (شکل ۸). این عناصر که از نوع متحرک در سیال محسوب می‌شوند به خوبی می‌توانند بیانگر تاریخچه واقعی مرتبط با غنی‌شدنگی سریانتینیت‌ها

برای تعیین محیط تکتونیکی پیدایش سنگ‌های الترامافیکی پراکنده در ناحیه غرب ماکو به رسم نمودارهای هارکرگونه بر مبنای اکسید منیزیم برای برخی اکسیدها و عناصر انتخابی مانند اکسیدهای سیلیسیم، تیتانیم، آلومینیم، ایتریم، ایتریبیم، اسکاندیم و لوتسیم اقدام شد (شکل‌های ۶ و ۷). از آنجا که نمونه‌ها به شدت منیزیم از دست داده‌اند، بنابراین نمونه‌ها در هیچ‌یک از محدوده‌های الترامافیک‌های مناطق عمیق و یا جلوی قوسی (فرافروانشی) قرار نگرفتند. اگر مسئله افت محتوای منیزیم را در نظر نگیریم نمونه‌ها به خوبی روند موازی با مناطق جلوی قوسی را ثبت کرده‌اند (شکل ۶). بخصوص وانادیم و آلومینیم



شکل ۶. نمودار تغییرات اکسید منیزیم در برابر a) سیلیسیم، b) اکسید آلومینیم و c) تیتانیم برای سرپانتینیت‌های غرب ماقو و نیز افیولیت‌های مهم خطدرز نئوتنتیس. افت محتوای منیزیم به‌واسطه سرپانتینی شدن مانع از جایگیری نقاط در محدوده‌های مورد نظر شده است. با این وجود موازات روند جلوی قوسی تا حدی دیده می‌شود. (محدوده‌های الترامافیک‌های مناطق عمیق و جلوی قوسی از Niu et al., 1997 و Parkinson and Pearce, 1998)



شکل ۷. نمودارهای تغییرات اکسید منیزیم در برابر عناصر جزئی مانند a) ایتریم، b) اسکاندیم، c) ایتریم و d) لوتسیم که روند کاهش منیزیم از استقرار نمونه‌ها در محدوده‌های مورد نظر ممانعت کرده است

نتیجه می‌شود (شکل ۸). نکته مهم گستره باوری مجدد این سرپانتینیت‌ها توسط تبادلات سنگ/سیال است و در نمودارها به خوبی مشهود است. غنی‌شدگی از عناصر متحرک در سیال در نمودارها ناشی از همین پدیده است.

باشنده. شدت سرپانتینیت شدن منجر به از دست رفتن شدید مقدار منیزیم در این سنگ‌ها شده و مانع از دسته‌بندی صحیح این سنگ‌ها شده است. با این وجود تعلق این سنگ‌ها به گروه سرپانتینیت‌های لیزاردیتی فروزانده شده از این نمودارها

جدول ۱. مشخصات ژئوشیمیایی انواع سرپانتینیت‌های محیط‌های مختلف (Deschamps et al., 2013)

سرپانتینیت‌های مناطق عمیق	سرپانتینیت‌های فروزانده شده	سرپانتینیت‌های گوه‌گوشته‌ای	سیالات مشتق شده از سرپانتینیت‌ها
محتوای Ti متوسط	محتوای Ti بالا	محتوای Ti کم تا متوسط (FME)	محتوای Ti کم تا متوسط (۵-۳۰ ppm)
محتوای Yb به نسبت ثابت (ppm ۰/۰۵-۰/۰۵)	محتوای Yb غنی‌شده (ppm ۱/۰۲)	محتوای Yb پایین (ppm <۰/۰۵)	نسبت بالایی از عناصر جزئی شامل: U/Th, Sb/Ce, Sr/Nd و غنی‌از B
ناهنجری مثبت Eu	ناهنجری مثبت LOI	LOI بالا	FMQ-2 تا FMQ
کروم اسپینل: Cr <sup>#</sup> >0.6, X <sub>Mg</sub> <0.4	کروم اسپینل: Cr <sup>#</sup> <0.6, X <sub>Mg</sub> >0.4	FMQ+1-FMQ-1	Eu
غنی از Eu و Pb	غنی از انصار نادر خاکی به نسبت مسطح	غنی از LILE	کروم اسپینل: Cr <sup>#</sup> <0.6, X <sub>Mg</sub> >0.4
شواهد قوی مبنی بر غنی‌شدگی ثانویه/باروری مجدد			

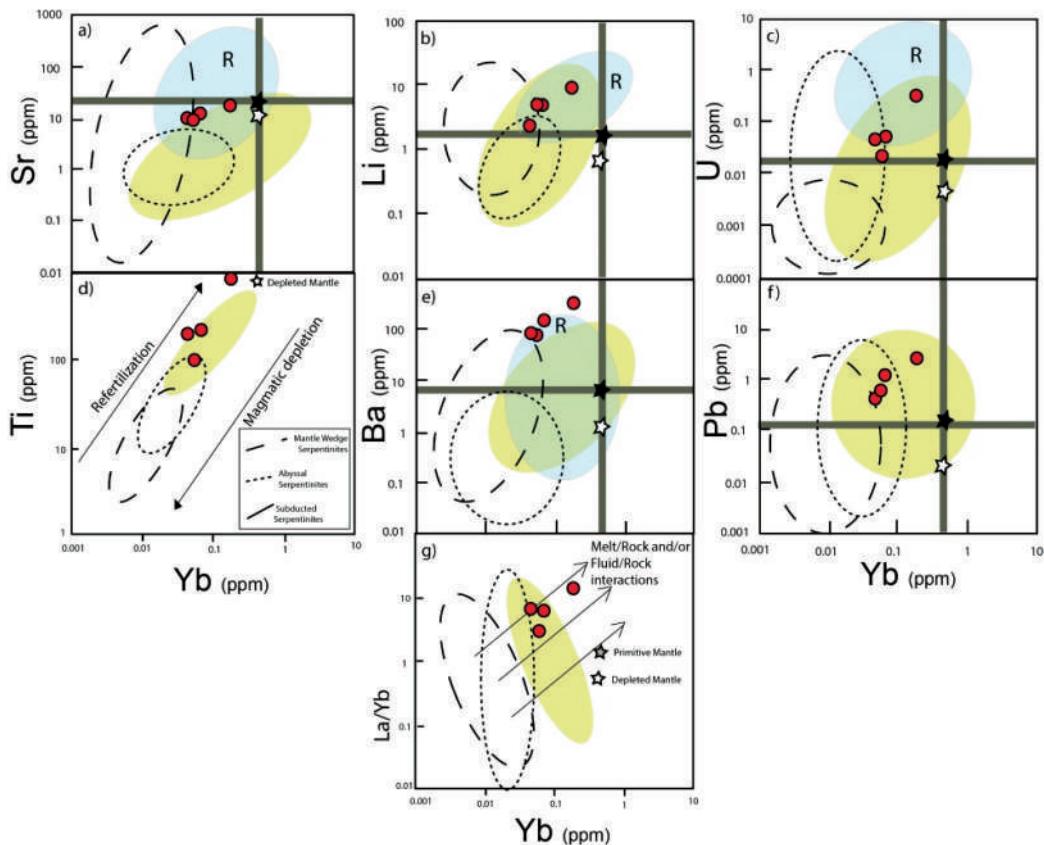
معناداری از عناصر اورانیوم، سرب و استرانسیم نسبت به گوشته اولیه در این سنگ‌ها مشاهده می‌شود که همگی جزء عناصر محلول در سیال<sup>۱</sup> هستند. این مشخصه عمومی همه سرپانتینیت‌ها است و اغلب پترولوجیست‌ها فراوانی بالای عناصر ناسازگاری مانند استرانسیم و سرب را به وجود رگه‌های کربناته ثانویه داخل این گروه سنگ‌ها نسبت می‌دهند (Kochergina et al., 2016). اما درباره اورانیم باید در نظر داشت که غنی‌شدگی از آن در سرپانتینیت‌های حاشیه غیرفعال یا در پشت‌های میان اقیانوسی شایع است (Barnes et al., 2013). اغلب سرپانتین به عنوان یک حامل دینامیک برای اورانیم شناخته می‌شود (Kodolanyi et al., 2012). از این‌رو بالا بودن نسبی محتوای اورانیم را می‌توان بهشت سرپانتینی شدن سنگ‌های الترامافیک غرب ماقو نسبت داد. علاوه بر سه عنصر اورانیم، سرب و استرانسیم باید به بالا بودن محتوای باریم نیز اشاره کرد (بیش از ۳۶۰-۱۵۰ پی ام) که خود یک مشخصه پوسته‌ای است.

درباره منشاء سیالات مؤثر در باوری سرپانتینیت‌ها لازم به ذکر است که با فروزانش تختال اقیانوسی که آبگیری و گرمایش آن توسط دگرگونی پیشرونده در کanal فروزانش (Green, 2007)، سیالات زیادی از این تختال آزاد شده و همین سیالات رهاسده باعث ذوب بخشی گوه‌گوشته‌ای و قوع ماگماتیسم قوس‌های فروزانشی می‌شود. میزان متوسط آب در پوسته اقیانوسی در رخساره تدفینی زئولیتی حدود ۷ درصد است و در سنگ‌های رخساره اکلوژیت این عدد به ۰/۰۹ درصد کاهش می‌یابد (Rüpke et al., 2004). پس می‌توان نتیجه گرفت، به طور تقریبی کل آب پوسته اقیانوسی به درون گوه‌گوشته‌ای نفوذ و در آن انتشار می‌یابد. همین نکته باعث غنی‌شدگی متاسوماتیک (بارورسازی مجدد) سنگ‌های این ناحیه می‌شود.

به دلیل پایداری نسبی عناصری مانند اورانیم، سرب، زیرکونیم و نیوبیم سعی شد از نسبت‌های معرفی شده بین این عناصر برای شناخت ویژگی‌های ترکیبی نمونه‌های مورد مطالعه استفاده شود (شکل ۹). نمونه‌های یاد شده به خوبی روند سنگ‌های ماگماتی از گوشته تهی‌شده تا گوشته غنی‌شده و مورب غنی‌شده را دنبال کرده است. بی‌هنجری

1. Refertilization

2. Fluid Mobile Elements (FMEs)



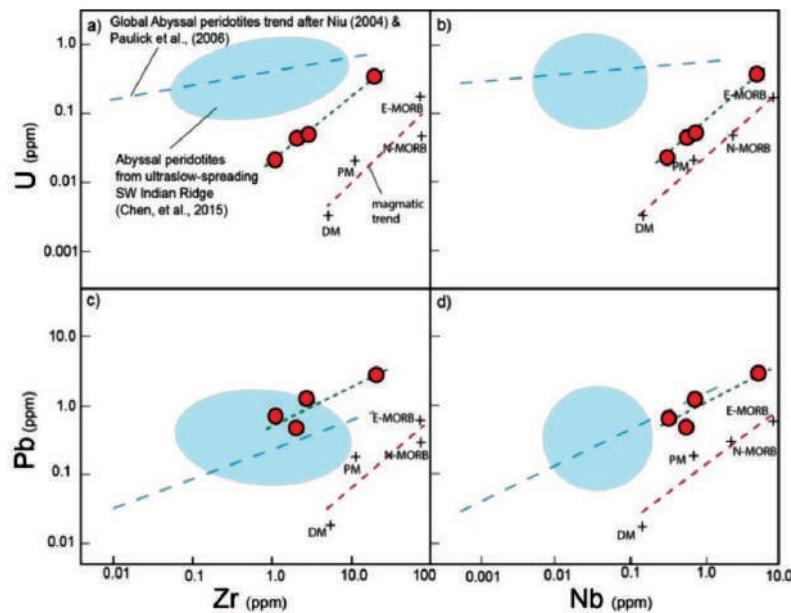
شکل ۸. (a-g) نمودارهای تعیین نوع خاستگاه سرپانتینیت‌های مناطق عمیق، فروزانده شده و گوه گوشته‌ای (Deschamps et al., 2013). سرپانتینیت‌های غرب ماکو در هر سه مورد در گستره نوع فروزانده شده قرار دارند. علامت‌های سtar برای نشان دادن گوشته تهی شده و غنی شده و گستره خاکستری برای نمایش آرایه گوشته اقیانوسی استفاده شده است، نمودارهای برای بررسی غنی‌شدگی سرپانتینیت‌ها از عناصر متتحرک در سیال (Niu, 2004) نیز کارآیی دارند، بخش آبی که با علامت R مشخص شده بیانگر سرپانتینیت‌های دچار باروری مجدد شده طی فرایند سرپانتینی شدن و تبادل سنگ/سیال است.

دلیل پتانسیل یونی مشابه به هم شبیه است ولی توریم در سیالات نامتحرک و اورانیم متتحرک است (Parkinson and Pearce, 1998). این مورد به ویژه در پریدوتیت‌های ناحیه فروزانشی بیشتر اهمیت پیدا می‌کند. اورانیم طی دگرسانی با سیالات از سنگ‌ها خارج شده ولی توریم بهجا می‌ماند و این دو از هم جدا می‌شوند. پس می‌توان نتیجه گرفت، فراوانی نسبی اورانیم حاصل تعامل با سیالات کف اقیانوسی و دگرسانی هیدروترمال ایجاد شده است (Niu, 2004). در نمودارهای شکل ۱۰ نیز این دو عنصر همبستگی مثبت خوبی با هم نشان می‌دهند و به خاطر افزودگی بعدی اورانیم ایجاد شده است.

همخوانی مثبت بین اورانیم و سرب در الترامافیک‌های غرب ماکونیزیک مشخصه همیشگی برای انواع سرپانتینیت‌ها محسوب می‌شود و نشان از نقش پرنگ فرایندهای ماقمایی

الگوی زنگولهای عناصر نادر خاکی در این سنگ‌ها می‌تواند نشانه‌ای از آلایش با سیالات یا مذاب‌های پوسته قاره‌ای در پی صعود (Gruau et al., 1998)، یا در اثر صعود گوشته و تبادلات متاسوماتیک با بخش‌های غنی‌شده آن به وجود آمده باشد. درجه بالای سرپانتینی شدن این سنگ‌ها احتمال آلایش با سیالات دگرگونه قاره‌ای و یا حتی آبهای جوی را نیز افزایش می‌دهد. در حقیقت سرپانتینی شدن نوعی دگرسانی هیدروترمال سنگ‌های الترامافیک در شرایط دما پایین تا متوسط است (Huang et al., 2013). طی این فرایند فازهای مافیکی نظیر الیوین و پیروکسن به گروه کانی‌های سرپانتین تجزیه شده و از خلل واکنش بین بروسیت و کوارتز، مگنتیت و هیدروژن بجا ماند (Wu et al., 2020).

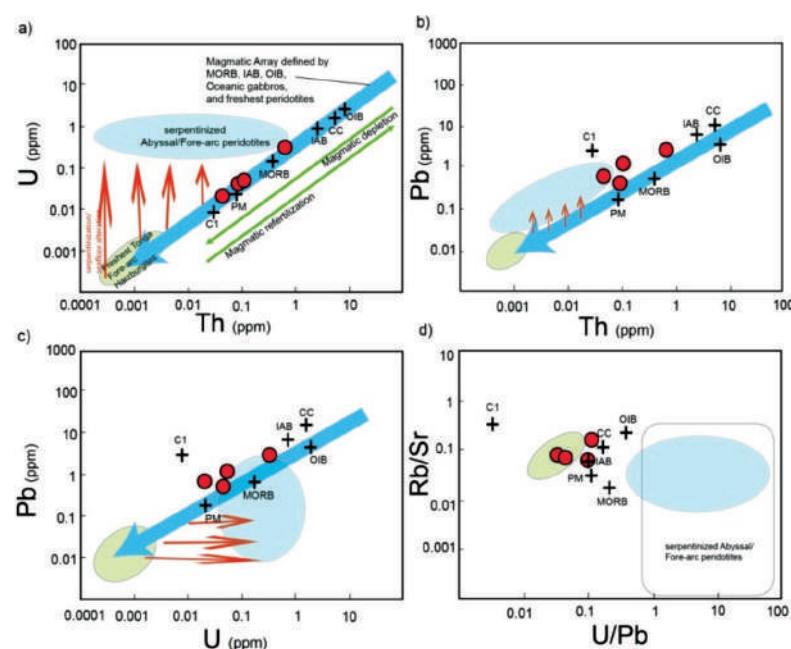
با وجود اینکه رفتار ژئوشیمیایی اورانیوم و توریم اغلب به



شکل ۹. a-d) نمودارهای عناصر زیرکونیم و نئوبیم در برابر اورانیم و سرب برای سریانتینیت‌های غرب مako که در آن روند تحولات ماقمایی و نیز موقعیت گوشه‌تهی شده، غنی‌شده و بازالت‌های پشتہ میان اقیانوسی عادی و غنی‌شده مشخص شده‌اند، بعلاوه پریدوتیت‌های اقیانوس‌های با گسترش کند با رنگ آبی مشخص شده و مرجع داخل شکل آمده است

از نظر نسبت Rb/Sr و نیز نسبت U/Pb سنگ‌های مورد بحث مشخصاتی نظیر پوسته قاره‌ای یا محیط جلوی قوس از خود نشان می‌دهند (شکل ۱۰-d). (Paulick et al., 2006)

در کانال فروراشی برای افزایش سرب، دارد. تبدلات سنگ/سیال در این ناحیه می‌تواند بهترین توضیح برای غنی‌شدنگی این عنصر باشد.



شکل ۱۰. a-d) نمودارهای تعیین محیط تکتونیکی برای سریانتینیت‌های غرب مako، بعلاوه موقعیت پریدوتیت‌های مناطق عمیق، بازالت‌پشتہ میان اقیانوسی، بازالت جزایر قوسی، گابروی اقیانوسی، پریدوتیت‌های جلوی قوسی گودال ماریانا و نیز پریدوتیت‌های جلوی قوسی تونگا مشخص شده‌اند، MORB, Niu et al. (1999); IAB, Ewart et al. (1998) from Mariana and Tonga; oceanic gabbros, Bach et al. (2009), Niu et al. (2002), Niu and O'Hara (2003). Average OIB, PM and C1 values are from Sun and McDonough (1989) .., and CC (bulk continental crust) from Rudnick and Fountain (1995)

## نتیجه‌گیری

.۱۳ (۴۹-۶۱)

- روستاپی، م.، زمانی، ب.، نواب پور، پ. و مؤید، م.، ۱۳۹۳. بررسی ساز و کار و نئوتکتونیک زون گسله سیه چشمۀ خوی، علوم زمین، ۲۴ (۹۶) : ۲۲۱-۲۲۴.
- مجرد، م.، ۱۴۰۱. پترولوزی گدازه‌های جوان ماکو-پلدشت: با نگاهی به توزیع اندازه بلورهای الیوین و حفرات، زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۲ (۴) : ۹۸۱-۱۰۰.
- مجرد، م. و مؤید، م.، ۱۴۰۳. ژئوشیمی سریانتینیت‌های قطعه مرکزی خط درز نئوتیس از شمال‌غرب ایران تا زاگرس عراقی و شرق آناتولی، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۸ (۶۹) : ۴۹-۶۶.
- مجیدی، م.، ۱۳۸۵. ورقه ۱:۱۰۰۰۰ سیه چشمۀ سازمان زمین‌شناسی کشور. تهران.
- نیک‌بخت، س.، بیابان‌گرد، ح. و باقری، س.، ۱۳۹۹. پترولوزی و ژئوشیمی افیولیت سیاه جنگل، شمال‌شرق آتشفسان تفتان، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۴ (۵۶) : ۸۷-۹۹.

- Bellon, H. and Braud, J., 2003. Carbonate Sedimentary Environment, John Wiley, 360.
- Cliff, R.A., Droop, G.T. and Rex, D., 1985. Alpine metamorphic in the south-east Taurian Window. Journal of Metamorphic Geology, 3(4), 403-415.
- Bach, W. and Klein, F., 2009. The petrology of seafloor rodingites: insights from geochemical reaction path modelling. Lithos, 112, 103-117.
- Barnes, J. D., Eldam, R., Lee, C. T. A., Errico, J. C., Loewy, S. and Cisneros, M., 2013. Petrogenesis of serpentinites from the Franciscan Complex, western California, USA. Lithos, 178, 143-157. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.12.018>.
- Barrier, E. and Vrielynck, B., 2008. Paleotectonic maps of the Middle East-Atlas of 14 maps, in: Middle East Basin Evolution Programme.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian Journal of Earth Sciences, 18, 210-265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>.

- سنگ‌های الترامافیک سریانتینی شده غرب ماکو در حد توده‌های کوچک و پراکنده در مرز با کشور ترکیه متعلق به مراحل بسته شدن اقیانوس نئوتیس شمالی است. این ناحیه بخشی از بلوک ارمنستان جنوبی (SAB) و در زمرة سرزمین‌های گندوانایی محسوب می‌شوند.
- فازهای کانیایی به صورت بقاپایی حفظ شده با فراوانی حجمی اندک در یک متن سریانتینی دیده می‌شوند و شامل الیوین غنی از فورستیت، ارتوپیروکسن غنی از استاتیت، کلینوپیروکسن غنی از دیپسید با فراوانی کم و نیز اسپینل تکه تکه شده غنی از کروم به میزان بسیار کمتر می‌باشد. بنابراین سنگ‌ها در گروه هارزبورزیت سریانتینی قرار می‌گیرند. بخشی از کلینوپیروکسن‌ها نیز ثانویه و متاسوماتیک هستند بنابراین در نام سنگ دلالت داده نشده‌اند.

- الگوی عناصر نادرخاکی این سنگ‌ها حالت زنگله‌ای داشته، قابل قیاس با الترامافیک‌های جلوی قوسی و دارای شواهدی از تعامل با پوسته قاره‌ای است.
- با دقت در فراوانی‌ها، نسبت‌ها و نمودارهای متعدد بر مبنای اکسید عناصر اصلی، جزئی و نادر خاکی سریانتینیت‌های غرب ماکو از نوع فرورانده شده طبقه‌بندی شد.
- فراوانی عناصری مانند اورانیم، سرب و استرانسیم که جزء عناصر متحرک در سیال (FME) هستند، در این سنگ‌ها نسبت به گوشه‌های اولیه بالاتر است و این نشانه باروری مجدد حاصل از تبادل سنگ/سیال طی مراحل فرورانش می‌باشد و آن را به خوبی از انواع دیگر متمایز می‌کند.

## منابع

- آقانباتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران.
- جلالت وکیل‌کندي، ص.، شاه پسندزاده، م.، هنرمند، م. و احمدی پور، ح.، ۱۳۹۸. الگوی ساختاری بخش خاوری توده پریدوتیتی ده شیخ، آمیزه افیولیتی اسفندقه، جنوب باخت ایران، فصلنامه زمین‌شناسی ایران،

- Berberian, M., 1997. Tectonic and Fault Reevaluation Study of the Bushehr Nuclear Power Plant Site. Khak-e Khub, Atomic Energy Organization of Iran (AEOI), April 1997, 98 pages, 5 Maps and Figures, 48 Plates in 13 Chapters (in English).
- Dilek, Y. and Furnes, H., 2014. Ophiolites and their origins. *Elements*, 10, 93–100.
- Deschamps, F., Godard, M., Guillot, S. and Hattori, K., 2013. Geochemistry of subduction zone serpentinites. A review: *Lithos*, 178, 96–127.
- Ewart, A., Collerson, K. D., Regelous, M., Wendt, J. I. and Niu, Y., 1998. Geochemical evolution within the Tonga-Kermadec-Lau arc-backarc system: the role of varying mantle wedge composition in space and time. *Journal of Petrology*, 39, 331–368.
- Green II, H.W., 2007. Shearing instabilities accompanying high-pressure phase transformations and the mechanics of deep earthquakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 9133–9138.
- Grosjean, M., Moritz, R., Rezeau, H., Hovakimyan, S., Ulianov, A., Chiaradia, M. and Melkonyan, R., 2022. Arabia-Eurasia convergence and collision control on Cenozoic juvenile K-rich magmatism in the South Armenian block. Lesser Caucasus. *Earth-Science Reviews*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103949>.
- Gruau, G., Bernard-Griffiths, J. and Lecuyer, C., 1998. The origin of U-shaped rare earth patterns in ophiolite peridotites: Assessing the role of secondary alteration and melt/rock reaction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, 21/22: 3545–3560.
- Huang, R. F., Sun, W. D., Ding, X. and Wang, Y. R., 2013. Mechanism for serpentinitization of mafic and ultramafic rocks and the potential of mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4, 336–4,348 (in Chinese with English abstract).
- Kochergina, Y. V., Ackerman, L., Erban, V., Matusiak-Małek, M., Puziewicz, J., Halodová, P. and Magna, T., 2016. Rhenium-osmium isotopes in pervasively metasomatized mantle xenoliths from the Bohemian Massif and implications for the reliability of Os model ages. *Chemical Geology*, 430, 90–107. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.03.020>.
- Kodolányi, J., Pettke, T., Spandler, C., Kamber, B. S. and Gmélíng, K., 2012. Geochemistry of ocean floor and fore-arc serpentinites: Constraints on the ultramafic input to subduction zones. *Journal of Petrology*, 53(2), 235–270. <https://doi.org/10.1093/petrology/egr058>.
- Li, X. P., Rahn, M. and Bucher, K., 2004. Serpentinites of the Zermatt-Saas ophiolite complex and their texture evolution. *Journal of Metamorphic Geology*, 22, 159–177. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2004.00503.x>
- Modjarrad, M., Whitney, D.L. and Omrani, H., 2024a. Petrologic evolution of the Gysian ophiolitic serpentinites, NW Iran. *Acta Geochim*, <https://doi.org/10.1007/s11631-024-00682-6>
- Modjarrad, M., Whitney, D.L. and Omrani, H., 2024b. The P-T-X conditions of staurolite-garnet metabasites, NW Iran: implications for metamorphism during Arabia-Eurasia collision. *Journal of Asian Earth sciences*: X, <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2024.100175>
- Modjarrad, M., Uysal, İ., Moghadam, H.S., Demir, Y. and Müller, D., 2025. Geochemical insights and petrogenetic processes of ophiolitic fragments from the Avajiq and Silvana: Implications for Neo-Tethyan Evolution in Northwest Iran. *International Geology Reviews*, <https://doi.org/10.1080/00206814.2025.2453979>
- Mohajjal, M., and Ferguson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran.

- Journal of Structural Geology, 22, 1125-1139. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00023-7).
- Mohammadi, A., Burg, J.P. and Guillong, M., 2020. The Siah Cheshmeh-Khoy-Misho-Tabriz fault (NW Iran) is a cryptic neotethys suture: evidence from detrital zircon geochronology, Hf isotopes, and provenance analysis, International Geology Review, <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1845992>
  - Neill, I., Meliksetian, Kh., Allen, M.B., Navarsardyan, G. and Karapetyan, S., 2013. Pliocene–Quaternary volcanic rocks of NW Armenia: magmatism and lithospheric dynamics within an active orogenic plateau. *Lithos*, 180–181, 200–215
  - Nikogosian, I.K., Bracco Gartner, A.J.J., Mason, P.R.d., van Hinsbergen, D.J.J., Kuiper, K.F., Kirscher, U., Matveev, S., Grigoryan, A., Grigoryan, E., Israyelyan, A., van Bergen, M.J., Koornneef, J.M., Wijbrans, J.R., Davies, G.R. and Meliksetian, K., 2023. The South Armenian Block: Gondwanan origin and Tethyan evolution in space and time. *Gondwana Research*, 121, 168–195. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.03.023>
  - Niu, Y., Langmuir, C.H. and Kinzler, R.J., 1997. The origin of abyssal peridotites: a new perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 152, 251–265
  - Niu, Y., 1999. Comments on some misconceptions in igneous/ experimental petrology and methodology: a reply. *Journal of Petrology*, 40, 1195–1203
  - Niu, Y., Gilmore, T., Mackie, S., Greig, A. and Bach, W., 2002. Mineral chemistry, whole-rock compositions and petrogenesis of ODP Leg 176 gabbros: data and discussion. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 176, 60. [Online] Available at [http://www-odp.tamu.edu/publications/176\\_SR/chap\\_08/chap\\_08.htm](http://www-odp.tamu.edu/publications/176_SR/chap_08/chap_08.htm)
  - Niu, Y. and O'Hara, M.J., 2003. The origin of ocean island basalts (OIB): a new perspective from petrology, geochemistry and mineral physics considerations. *Journal of Geophysical Research*, 108, 10.1029/2002JB002048, 19.
  - Niu, Y., 2004. Bulk-rock major and trace element compositions of abyssal peridotites: implications for mantle melting, melt extraction and post-melting processes beneath mid-ocean ridges. *Journal of Petrology*, 45, 2423–2458.
  - Parkinson, I.J. and Pearce, J.A., 1998. Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg 125): evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a suprasubduction zone setting. *Journal of Petrology*, 39 (9), 1577–1618.
  - Paulick, H., Bach, W., Godard, M., De Hoog, J.C.M., Suhr, G. and Harvey, J., 2006. Geochemistry of abyssal peridotites (Mid-Atlantic Ridge, 15°20'N, ODP Leg 209): implications for fluid/rock interaction in slow spreading environments. *Chemical Geology*, 234, 179–210.
  - Pearce, J. A. and Robinson, P. T., 2010. The Troodos ophiolitic complex probably formed in a subduction initiation, slab edge setting. *Gondwana Research*, 18(1), 60–81. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.12.003>
  - Pfeifer, H. R., 1990. Major and Trace Element Discrimination Diagrams to Determine Possible Protoliths of Orogenic Ultramafic Rocks. Universite de Lausanne.
  - Rolland, Y., Hässig, M., Bosch, D., Bruguier, O., Melis, R., Galoyan, G., Topuz, G., Sahakyan, L., Avagyan, A. and Sosson, M., 2020. The East Anatolia-Lesser Caucasus ophiolite: An exceptional case of large-scale obduction, synthesis of data and numerical modelling. *Geosciences Frontiers*, 11, 83–108. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.009>
  - Rudnick, R. L. and Fountain, D. M., 1995. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Review of Geophysics*, 33, 267–309.
  - Rüpke, L.H., Morgan, J.P., Hort, M. and

- Connolly, J.A.D., 2004. Serpentine and the subduction zone water cycle. *Earth and Planetary Science Letters*, 223, 17–34.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In A. D. Saunders and M. J. Norry (Eds.), (42: 313–345). *Magmatism in the Ocean Basins: Geological Society Special Publication*. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
  - Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: Its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks*; Blackwell, Oxford. 312.
  - Uysal, İ., 2008. Platinum-group minerals (PGM) and other solid inclusions in the Elbistan-Kahramanmaraş, mantle-hosted ophiolitic chromitites, south-eastern Türkiye: their petrogenetic significance. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17, 729–740.
  - Uysal, İ., Tarkian, M., Sadiklar, M.B., Zaccarini, F., Meisel, T., Garuti, G. and Heidrich, S., 2009. Petrology of Al-and Cr-rich ophiolitic chromitites from the Muğla, SW Türkiye: implications from composition of chromite, solid inclusions of platinum-group mineral, silicate, and base-metal mineral, and Os-isotope geochemistry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158, 659–674.
  - Uysal, İ., Akçam, R.M., Kapsiotis, A., Demir, Y., Saka, S., Avcı, E. and Müller, D., 2015. Genesis and geodynamic significance of chromitites from the Orhaneli and Harmancık ophiolites (Bursa, NW, Türkiye) as evidenced by mineralogical and compositional data. *Ore Geology Reviews*, 65, 26–41.
  - Wakabayashi, J., 2017. Structural context and variation of ocean plate stratigraphy, Franciscan Complex, California: Insight into mélange origins and subduction-accretion processes. *Progress in Earth and Planetary Science*, 4:, 18, <https://doi.org/10.1186/s40645-017-0132-y>.
  - Whattam, S.A. and Stern, R.J., 2011. The ‘subduction initiation rule’: A key for linking ophiolites, intra-oceanic fore arcs, and subduction initiation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162, 1031–1045. doi:10.1007/s00410-011-0638-z.
  - Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1), 185–187.
  - Wu, K., Yuan, H. L., Lyu, N. and Zhang, L. P., 2020. The behavior of fluid mobile elements during serpentinization and dehydration of serpentinites in subduction zones. *Acta Petrologica Sinica*, 36(1), 141–153. (in Chinese with English abstract).
  - Xin, G.Y., Chu, Y., Su, B.X., Lin, W., Uysal, I. and Feng, Z.T., 2021. Rapid transition from MORB-type to SSZ-type oceanic crust generation following subduction initiation: insights from the mafic dikes and metamorphic soles in the Pozanti-Karsanti ophiolite, SE Türkiye. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 176, 64 <https://doi.org/10.1007/s00410-021-01821-5>
  - Zhang, Z., Xiao, W., Ji, W. and Majidi-fard, M.R., 2018. Geochemistry, zircon U-Pb and Hf isotope for granitoids, NW Sanandaj-Sirjan zone, Iran: Implications for Mesozoic-Cenozoic episodic magmatism during Neo-Tethyan lithospheric subduction. *Gondwana Research*, 62: 227–245. doi:10.1016/j.gr.2018.04.002.

شیمی کانی و ژئوشیمی عناصر جزئی/ نادرخاکی در الترامافیک‌های غرب ماکو

جدول ۱S. نتایج تجزیه اکسید عناصر اصلی در سنگ‌های الترامافیک سرپانتینی غرب ماکو به همراه محاسبه نورم. مخفف‌ها شامل:

D.L.: Detection Limit; SAV: Standard Analyses Values; S.D.: Standard Deviation

(wt.%)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	D.L.	SAV	S.D.
SiO <sub>2</sub>	۴۰/۱۲	۳۹/۹۸	۴۰/۷۹	۳۵/۳۲	۳۹/۵۸	۳۷/۵۸	۳۸/۸۹	۳۷/۸۹	۰/۰۵	Si	۲۲/۴۲
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۵۶	۰/۵۲	۰/۴۲	۰/۶۸	۰/۶۳	۰/۵۹	۰/۶۱	۱/۲۸	۰/۰۵	Ti	۰/۱۴۴
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۷/۸۲	۷/۸۹	۷/۹۱	۱۰/۰۳	۷/۹۵	۷/۹۳	۷/۹۹	۶/۹۱	۰/۰۵	Al	۶/۰۲
MnO	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۰۵	Cr	۱/۳۶
MgO	۳۴/۸۴	۳۵/۹۵	۳۵/۶۹	۳۶/۵۲	۳۴/۹۴	۳۶/۹۵	۳۵/۷۹	۳۴/۸۳	۰/۰۵	Fe	۸/۰۰
CaO	۰/۸۷	۰/۸۱	۰/۰۶	۰/۹	۰/۸۳	۰/۹۴	۰/۹۳	۴/۱۷	۰/۰۵	Mn	۰/۱۲۹
SO <sub>3</sub>	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۸	۰/۱۵	۰/۲۹	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۰۵	Ni	۰/۲۲۳
L.O.I.	۱۵/۰۲	۱۴/۰۳	۱۴/۲۶	۱۵/۰	۱۵/۲۳	۱۴/۸۹	۱۴/۸۶۸	۱۴/۱۷	۰/۰۵	Mg	۱/۰۸۵
Total	۹۹/۹۲	۹۹/۵۵	۹۹/۵۱	۹۹/۸۵	۹۹/۴۶	۹۹/۲۹	۹۹/۴۷۸	۹۹/۶۷		Ca	۴/۵۶
Anorthite(An)	۱/۵۳	۱/۴۲	۰/۳۰	۱/۸۶	۱/۷۲	۱/۶۱	۱/۶۶	۳/۴۹			
Diopside(Di)	۱/۴۰	۰/۶۶	۰	۲/۰۴	۱/۸۷	۲/۳۸	۲/۳۰	۱۳/۴۱			
Hypersthene(Hy)	۴۳/۱۴	۳۹/۸۳	۴۶/۹۸	۲۱/۵۶	۴۰/۱۶	۲۷/۹۱	۳۵/۲۲	۱۶/۲۱			
Olivine(Ol)	۳۰/۱۳	۳۴/۶۳	۲۹/۳۷	۴۷/۹۷	۳۲/۲۴	۴۴/۱۶	۳۷/۰۴	۴۵/۰۹			
Magnetite(Mt)	۰/۴۲	۰	۰/۴۹	۰/۳۹	۰/۴۹	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۴۶			
Hematite(Hm)	۷/۵۳	۷/۸۹	۷/۵۷	۱۰/۲۶	۷/۶۱	۷/۶۶	۷/۷۰	۶/۵۹			
Color Index	۸۲/۶۲	۸۳/۲۵	۸۴/۴۱	۸۲/۲۲	۸۲/۳۷	۸۲/۵۱	۸۲/۶۸	۸۱/۷۶			
Mg#	۹۷/۲۵	۹۷/۳۱	۹۷/۲۸	۹۶/۴۹	۹۷/۲۱	۹۷/۳۶	۹۷/۲۶	۹۷/۵۶			
PGE	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	۰/۰۱		

جدول ۲S. نتایج تجزیه طیف سنجی جرمی بر روی عناصر جزئی و نادرخاکی در سرپانتینیت‌های غرب ماکو. فراوانی‌ها بر حسب بی‌پی آم می‌باشد.

	۱	۲	۳	۴
Ba	۳۶۰/۳۲۱	۹۸/۵۴۰	۹۱/۳۱۳	۱۴۷/۵۱
Cd	۰/۰۲۴	۰/۰۱۲	۰/۰۲۲	۰/۰۳۵
Ce	۷/۵۳۶	۰/۸۳۴	۰/۴۲۹	۱/۰۶۹
Co	۹۳/۰۴	۱۰/۱۷۱	۸۸/۰۶	۸۷/۹۳
Cr	۲۹۶/۶	۲۲۸۲/۹	۲۸۵۰/۹	۲۶۸۶/۵
Cs	۰/۱۷۱۱	۰/۰۵۸۱	۰/۲۲۳۹	۰/۲۰۳۳
Cu	۱۶/۸۵	۸/۳۲	۴/۳۷	۵/۳۶
Dy	۰/۳۲۹	۰/۰۴۵	۰/۰۴۰	۰/۰۶۸
Er	۰/۱۸۵۰	۰/۰۳۲۲	۰/۰۳۹۷	۰/۰۴۷۹
Eu	۰/۱۲۷۵	۰/۰۱۳۲	۰/۰۰۶۴	۰/۰۱۸۳
Ga	۲/۵۱۳	۰/۸۴۴	۱/۱۷۹	۱/۳۰۶
Gd	۰/۴۱۵	۰/۰۴۵	۰/۰۲۷	۰/۰۵۹
Hf	۰/۵۰۳	۰/۰۵۲	۰/۰۲۵	۰/۰۷۶
Ho	۰/۰۶۸۶	۰/۰۰۹۹	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۴۶
In	۰/۰۱۴۹	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۸۴	۰/۰۱۷۸
La	۲/۶۳۲	۰/۲۹۸	۰/۱۶۷	۰/۴۱۱
Li	۸/۹۹۸	۲/۲۴۱	۴/۸۷۲	۴/۷۸۰
Lu	۰/۰۲۶۷۸	۰/۰۰۸۳	۰/۰۱۰۴۶	۰/۰۱۱۲
Mo	۰/۴۸۴	۰/۳۵۱	۱/۵۱۸	۱/۵۱۲
Nb	۵/۲۰۳	۰/۵۷۲	۰/۳۲۱	۰/۷۱۶
Nd	۲/۳۰۶	۰/۲۶۷	۰/۱۴۸	۰/۳۲۶
Ni	۱۷۷۲/۱۸	۲۰۶۶/۹	۱۷۰۷/۳۵	۱۷۱۲/۰
Pb	۲/۸۳۵	۰/۴۶۱	۰/۶۵۴	۱/۲۰۷

## ادامه جدول .۲S

	۱	۲	۳	۴
Pr	۰/۶۱۲	۰/۰۶۵	۰/۰۳۹	۰/۰۹۳
Rb	۳/۴۸۵	۰/۵۸۲	۰/۷۲۵	۰/۹۵۱
Sc	۱۲/۴۳۵	۸/۹۷۸	۱۹/۵۵۴	۱۹/۴۸۶
Sm	۰/۴۵۸	۰/۰۵۰	۰/۰۲۹	۰/۰۶۵
Sr	۱۹/۸۳	۹/۷۷۴	۹/۶۲	۱۲/۷۲
Ta	۰/۲۸۷	۰/۰۳۹	۰/۰۳۰	۰/۰۴۶
Tb	۰/۰۵۹۴	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۸۹
Th	۰/۶۲۱۸	۰/۰۸۳۹	۰/۰۴۲۴	۰/۱۰۷۹
Ti	۱۶۰/۷/۴	۱۹۵/۴	۱۰۰/۴	۲۲۸/۴
Tm	۰/۰۲۶۳۳	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۷۱۰	۰/۰۰۹۲
U	۰/۳۳۱۶	۰/۰۴۴۳	۰/۰۲۱۵	۰/۰۵۱۸
V	۵۷/۵۸	۳۷/۷۲	۷۲/۳۵	۷۱/۲۶
W	۰/۳۹۱	۰/۲۱۴	۱/۱۵۸	۱/۱۰۳
Y	۱/۶۶۷	۰/۲۵۴	۰/۲۵۷	۰/۴۱۲
Yb	۰/۱۸۲۸	۰/۰۴۴۷	۰/۰۵۶۲	۰/۰۶۵۸
Zn	۴۴/۸	۴۵/۴	۳۴/۸	۳۵/۴
Zr	۲۰/۰۱	۲/۱۴	۱/۰۷	۲/۹۱

جدول ۳S. نتایج تجزیه نقطه‌ای کانی‌ها توسط دستگاه ریزکاونده الکترونی از نمونه‌های غرب ماکو. محاسبه کاتیون‌ها توسط نرم افزار AX انجام گرفته و مخفف N به معنی تعداد نقاط مورد تجزیه است.

	Ol N=41	Opx N=48	Cpx N=56	Spl N=40	Srp N=9
SiO <sub>2</sub>	۳۹/۸۵۸	۵۶/۴۳۷	۵۲/۹۶۰	۰/۰۷۷۵	۴۱/۷۰۲۶
TiO <sub>2</sub>	۰/۰۰۵		۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۵۴	۰/۳۲۷
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		۲/۰۳۶۸	۲/۳۸۴۱	۲۷/۹۱۸۵	۱/۳۶۹۶
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰۰۹	۰/۶۱۰۵	۰/۹۸۶۹	۳۹/۸۱۹۲	۰/۵۶۱۹
NiO	۰/۴۹۴	۰/۰۴۹۹	۰/۰۴۶۵	۰/۰۵۵۲	۰/۰۴۷
FeO	۷/۴۹۸۹	۵/۹۷۶۸	۲/۱۸۵	۲۱/۰۵۳۴	۵/۸۴۱۲
MgO	۵۰/۱۰۳۶	۳۳/۷۵۶۸	۱۷/۲۸۹۷	۱۰/۴۳۹۷	۳۵/۵۷۰۴
MnO	۰/۱۳۵۱	۰/۱۳۲۱	۰/۰۷۳۲	۰/۰۳۴۹	۰/۱۵۷۲
CaO	۰/۰۳۴۷	۱/۴۲۲۸	۲۳/۸۳۴۹	۰/۰۴۶۹	۰/۲۸۰۵
K <sub>2</sub> O		۰/۰۲۸۳	۰/۰۲۰۸	۰/۰۱۴۹	
Total	۱۰۰/۱۷۶۸	۱۰۰/۴۵۱	۹۹/۷۸۸۹	۹۸/۸۷	۸۵/۶۱۱۷
Si	۰/۹۸	۱/۹۴۱	۱/۹۳	۰/۰۰۳	۲/۰۱۵
Al		۰/۰۸۳	۰/۱۰۲	۰/۹۸۶	۰/۰۷۸
Cr		۰/۰۱۷	۰/۰۲۸	۰/۹۷۱	۰/۰۲۱
Fe <sup>3+</sup>	۰/۰۱	۰/۱۷۲	۰/۰۶۷	۰/۰۳۸	
Fe <sup>2+</sup>	۰/۱۸۶	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۵۱۳	۰/۲۳۶
Mn	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۶
Mg	۱/۸۳۶	۱/۷۳	۰/۹۳۹	۰/۴۸۷	۲/۵۶۲
Ca	۰/۰۰۱	۰/۰۵۲	۰/۹۳۱	۰/۰۰۲	۰/۰۱۵
Total	۳/۰۱۵	۴	۴	۳	۴/۹۳۵
Mg #	۰/۹۰۴	۰/۹۲۷	۰/۹۳۴	۰/۴۹	۰/۹۲
Cr #		۰/۱۷	۰/۲۲	۰/۵	



# مطالعه رخساره‌های رسوبی سازند فراقان در میادین خلیج فارس و بررسی کیفیت مخزنی آنها با استفاده از لگ‌های چاه‌پیمایی

ابراهیم سفیداری<sup>(۱)</sup>\* و جواد امرایی<sup>(۲)</sup>

۱. استادیار، گروه زمین‌شناسی نفت، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی
۲. استادیار رسوب‌شناسی و سنگ‌های رسوبی، شرکت ملی نفت ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰

## چکیده

سنگ‌های آواری از نظر ذخیره هیدرولوکربنی دارای اهمیت بالایی در مطالعات مخزنی می‌باشند. در سال‌های اخیر و به دنبال افزایش بی‌جوبی‌ها و بهبود روش‌های اکتشافی، سنگ‌های آواری مربوط به پالئوزوئیک در سرتاسر خاورمیانه بخصوص کشورهای خلیج فارس، اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. مشخصات سنگ‌شناسی و محیط رسوبی این توالی از پارامترهای مهم، تاثیر گذار بر کیفیت مخزنی آنها می‌باشد. مطالعه حاضر به بررسی مشخصات رسوب‌شناسی و تعیین رخساره‌های سازند فراقان با استفاده از مطالعات رسوب‌شناسی در چهار چاه از میادین دور از ساحل کشود و انطباق آن با استفاده از مفهوم رخساره‌های لگ در میادینی که تا فراقان حفاری شده‌اند، پرداخته است. بر اساس مطالعات پتروگرافی حاصل از خردکاری حفاری شش رخساره ماسه‌سنگ، ماسه‌گری و کی، گلسنگ قرمز، شیل سیاوه و سبز، سنگ‌آهک و رخساره سنگ مختلط در چاه مغزه‌دار تشخیص داده شد و در چهار زیرمحیط رسوبی (همراهی رخساره‌ای) دشت ساحلی، محیط ساحلی، تدریجی و دور از ساحل تقسیم‌بندی شدند.

با استفاده از داده‌های موجود از لگ‌های چاه‌پیمایی، شش رخساره لگ در چاهی که رخساره‌های رسوبی آن استخراج شده بود، مشخص شد. انطباق نتایج حاصل از رخساره‌های لگ با رخساره‌های رسوبی و همراهی رخساره‌ها نشان می‌دهد، رخساره‌های لگ استخراج شده انطباق مناسبی با رخساره‌های رسوبی دارند. رخساره لگ یک دارای سنگ‌شناسی آهکی، رخساره لگ دو و سه ماسه‌ای، رخساره لگ چهار ماسه حاوی شیل، رخساره پنج شیلی و رخساره شش حاوی شیل‌های قرمز رنگ می‌باشد. گسترش رخساره‌های لگ به چاه‌های فاقد مغزه حفاری شده در سازند فراقان نشان از تغییرات فراوانی این رخساره‌ها دارد و نشان‌دهنده تغییر جانی محیط رسوبی سازند فراقان است.

بررسی کیفیت مخزنی رخساره‌ها نشان می‌دهد که رخساره لگ دو و چهار بهترین کیفیت مخزنی را دارا می‌باشند. رخساره‌های مذکور در بخش‌های فراقان دو (F2) و فراقان یک (F1) دارای بیشترین فراوانی می‌باشند. بنابراین بهترین بازه از نظر کیفیت مخزنی در سازند فراقان به گستره دو و یک سازند اختصاص دارند.

**واژه‌های کلیدی:** سازند فراقان، رخساره‌های رسوبی، رخساره لگ، کیفیت مخزنی.

## مقدمه

سازند در میادین خلیج‌فارس وجود ندارد. بنابراین مهم‌ترین اطلاعات موجود از این سازند را می‌توان به خرده‌های حفاری و لاغ‌های چاه پیمایی اشاره کرد. از آنجایی که لاغ‌های چاه پیمایی ثبت پیوسته‌ایی از سازند را در شرایط زیرسطحی ارائه می‌دهد بنابراین از اهمیت بالایی در مطالعات زمین‌شناسی نفت برخوردار می‌باشند. از طرف دیگر با استفاده از خرده‌های حفاری و تهیه مقاطع نازک میکروسکپی می‌توان رخساره‌های رسویی اصلی سازند فراقان را شناسایی کرد. در این مطالعه با در نظر گرفتن عوامل بالا سعی شده مراحل کاری زیر انجام شود.

۱. بررسی رخساره‌های رسویی سازند فراقان با استفاده از مقاطع نازک تهیه شده از سازند
۲. استخراج رخساره‌های لاغ با استفاده از لاغ‌های چاه‌پیمای موجود در چاهی که مطالعات رسوب‌شناسی دارد
۳. بررسی ارتباط بین رخساره‌های لاغ و رخساره‌های رسویی در چاه مغزه و خرده حفاری دار
۴. گسترش رخساره‌های رسویی به چاه‌های موجود از میادین دیگر با استفاده از مفهوم رخساره لاغ
۵. بررسی کیفیت مخزنی رخساره‌های لاغ با استفاده از نتایج حاصل از ارزیابی‌های پتروفیزیکی

## زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه

گسترش جغرافیایی سنگ‌های پرمین ایران بسیار زیاد است و این باور وجود دارد که در زمان کربنیفر پسین یا پرمین پیشین، با آرام گرفتن رخداد زمین‌ساختی هرسی‌نین و حرکت‌های رو به پایین زمین، شرایط لازم برای پیشروی گستردۀ دریا فراهم آمده است (Zamanzadeh et al., 2009). به گونه‌ای که بسیاری از فرابوم‌های قدیمی در شمال آذربایجان، البرز، ایران مرکزی، سندج-سیرجان و زاگرس با دریای کم‌ژرف و پیشروندۀ پرمین پوشیده شدند. بنابراین، سنگ‌های پرمین را می‌توان روی ردیف‌های گوناگون کربنیفر، دونین، سیلورین، اردویسین و کامبرین مشاهده کرد. رسوبات پرمین ایران نشانگر سه چرخه بزرگ رسویی است و هر چرخه با رخساره‌های آواری پیشرونده آغاز و با افزایش ژرف‌گشایی، ردیف‌های کربناتی آهکی-دولومیتی تشکیل و

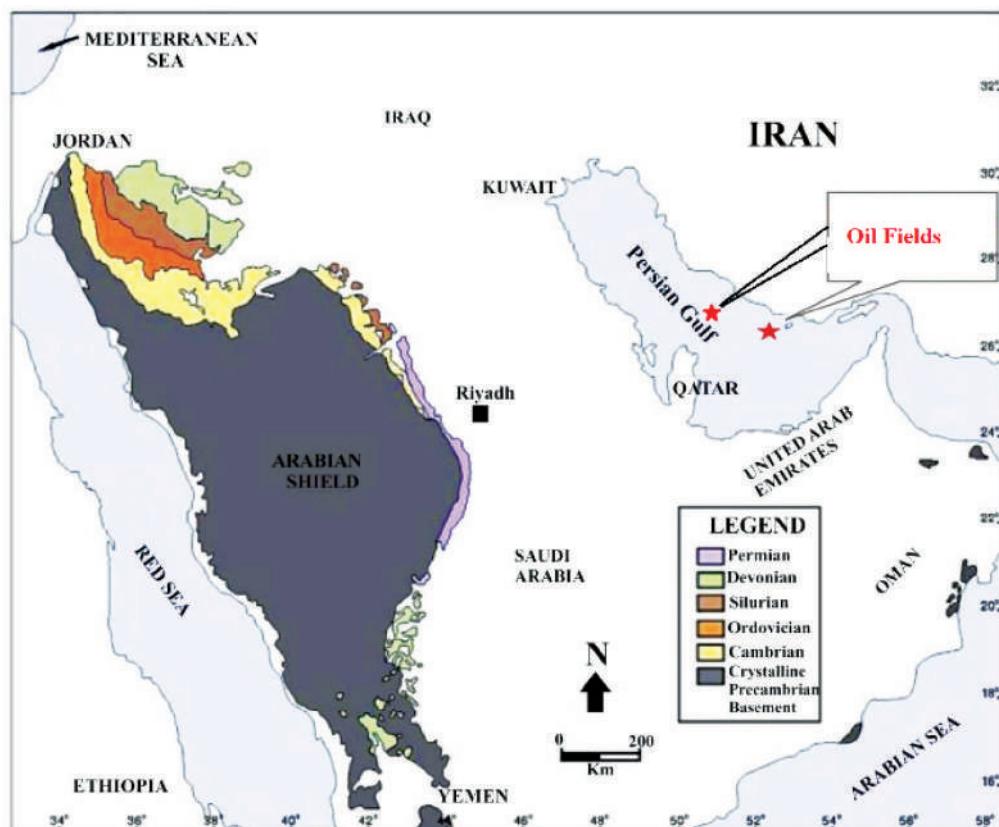
رسوبات آواری پالئوزوییک زاگرس برای اولین بار در کوه فراقان (Mollazal, 1965) و سپس در کوه گهکم مورد بررسی قرار گرفت (Szabo and Kheradpir, 1978). در سال ۱۹۷۱ کمیته ملی چینه‌شناسی ایران، اسم فراقان را که کوهی در نزدیکی محل شناسایی اولیه این سازند است را برای این رسوبات انتخاب کرد. بعدها بر اساس مطالعات پالینولوژی سن پرمین زیرین برای این سازند مشخص شد (Ghavidel Syooki, 1988, 1993, 1995, 1997, 2003).

سازند بیان شده در بخش‌های مختلفی از ایران در برش‌های بالای زمین و زیرزمینی نظیر اشترانکوه، زردکوه، چالیشه، کوه دینار، کوه گهکم، کوه سورمه، کوه فراقان، کوه سیاه، میدان سلمان، میدان گلشن و پارس جنوبی (امرائی و همکاران، ۱۳۹۷) مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به استخراج گاز و نفت سبک در سازندهای معادل فراقان Al-Dajani et al., 2000; Macdonald et al., 2010; Birkle et al., 2000; Khodayeva, 2019 و اثبات وجود هیدروکربور در سازند فراقان در میادین سلمان، گلشن و کیش، این سازند در مرکز توجه کارهای اکتشافی در میادین واقع در خلیج‌فارس قرار گرفت.

با وجود بررسی‌های روی زمینی (Zamanzadeh et al., 2009)، هنوز مطالعه جامعی بر روی مشخصات سنگ‌شناسی و کیفیت مخزنی این سازند در برش‌های زیرسطحی وجود ندارد (مهردی‌نیا و حرمی، ۱۳۸۸، امرائی و همکاران، ۱۳۹۷). با توجه به جایگاه چینه‌شناسی این سازند در زیر سازندهای کنگان و دالان که سنگ مخزن بزرگ‌ترین ذخیره گازی خاورمیانه در پارس‌جنوبی است و قرارگیری این سازند در بالای سازندهای شیلی‌سیاه و سرچاهان به عنوان سنگ منشا هیدروکربورهای پارس‌جنوبی (Kamali and Rezaee, 2003)، انجام مطالعات سنگ‌شناسی و بررسی کیفیت مخزنی این سازند از اهمیت خاصی برخوردار است. کیفیت مخزنی این سازند (ماهیت سنگ‌شناسی این سازند) به دلیل ماهیت سنگ‌شناسی این سازند (ماهیت سنگ‌های فاقد سیمان) و همچنین عمق بسیار زیاد و چاه‌های نادر و هزینه بالا در حال حاضر داده‌های مغزه جامعی از این

C و D به میدان گلشن اختصاص دارند. در مطالعه حاضر چاه A به صورت کامل سازند فراقان را حفاری کرده است. سازند بیان شده زیر سازند دالان (با تابو ماسه لیتیک دار) به صورت پیوسته و بالای سازند زاکین (دونین پسین) به صورت ناپیوستگی فرسایشی قرار دارد. لیتوژئی سازند فراقان در چاه مورد مطالعه بیشتر شامل ماسه سنگ و شیل است و در بخش های بالا و پایین مقداری کربنات نیز دارد. مرز پایینی سازند فراقان با یک ناپیوستگی مشخص می شود و روی رسوباتی به سن دونین قرار دارد و مرز بالایی سازند فراقان با کربنات های سازند دالان تدریجی است.

درنهایت با نهشته های آواری پسرونده به اتمام می رسد. سازند ماسه سنگی فراقان در حال حاضر واحد سنگ چینه ای ردیف های پیشرونده پرمین پیشین است (Ghavidel-Syooki, 1995). در گذشته این سازند را به سن پرموکربونیفر و زمانی نیز به ردیف های دونین نسبت می دادند اما مطالعه پالینومورف های این سازند نشان داد این نهشته ها معروف ساکمارین (برمین زیرین) هستند (Ghavidel-Syooki, 1988). مطالعه حاضر بر روی چهار چاه حفاری شده تا سازند فراقان، در منطقه دور از ساحل ایران انجام گرفت (شکل ۱). چاه های A و B مربوط به میدان پارس جنوبی و چاه های



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی میدان مورد مطالعه (Al-Ghazi, 2007)

## روش مطالعه

موجود از چاه A در بازه های یک متري ۲۴۵ مقطع نازک به منظور مطالعات رسوب شناسی تهیه شد. در سه چاه دیگر که تا سازند فراقان حفاری شده اند فقط لاغ های چاه پیمایی موجود است (جدول ۱). مطالعه حاضر در دو

این مطالعه بر اساس داده های موجود از چهار چاه اکتشافی که تا سازند فراقان حفاری شده اند انجام گرفته است. در چاه A سازند فراقان با ضخامت ۲۴۵ متر به صورت کامل حفاری شده است. در ابتدا از مغزه و خرد های حفاری

با استفاده از تخلخل مفید و اشباع شدگی حاصل از نتایج ارزیابی‌های پتروفیزیکی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. در آخر رخساره‌های استخراج شده در چاه A با استفاده از مفهوم رخساره‌های لاغ به بقیه چاه‌ها گسترش داده شده و بین چاه‌ها انطباق برقرار شد.

مرحله انجام گرفت. در مرحله اول با استفاده از مقاطع نازک تهیه شده، رخساره‌های رسوی در چاه A استخراج شد. در مرحله بعد با استفاده از روش خوش‌سازی مبتنی بر گراف رخساره لاغ در چاه A استخراج شد. در ادامه بین رخساره‌های رسوی‌شناسی و رخساره‌های لاغ انطباق برقرار شد. کیفیت محزنی هر یک از رخساره‌های استخراج شده

جدول ۱. شماره چاه‌ها و اطلاعات موجود از آنها در این مطالعه

Well name	core	cutting	Log data
A	✓	✓	✓
B	-	✓	✓
C	-	✓	✓
D	-	✓	✓

خوش‌های مختلف، چندین افت محسوس دیده می‌شود و مربوط به جدایش خوش‌های مختلف می‌باشند. شماره مربوط به این تغییرات ناگهانی به عنوان تعداد خوش‌های بهینه در نظر می‌گیرند. مزیت این روش نسبت به روش‌های دیگر این است که تعداد خوش‌های بهینه در طی یک مطالعه را به کاربر پیشنهاد می‌کند، همچنین کاربر می‌تواند روی انتخاب، ترکیب کردن و تفکیک کردن یک خوش به خوش‌های مجزا کنترل داشته باشد.

## بحث رخساره‌های رسوی

بر اساس عواملی از قبیل بافت، ساخت رسوی، فرم هندسی، محتوای فسیلی و سنگ‌شناسی در چاه مورد مطالعه شش پتروفاسیس براساس داده‌های سنگ‌شناسی و توصیف مغزه برای سازند فراقان معرفی شده‌اند. رخساره‌های بیان شده در چهار زیر محیط رسوی متفاوت تقسیم‌بندی شدند که در زیر مشخصات آنها به تفصیل آورده شده است. رخساره ماسه‌سنگ (PF1) در بررسی‌های میکروسکوپی این رخساره شامل کوارتز آرنایت با جورش‌دگی خوب تا بد مشاهده می‌شود. دانه‌های کوارتز از نظر شکل دارای گردش‌دگی خوب تا نیمه گرد هستند و نشان‌دهنده انرژی بالا و حمل زیاد این قطعات است. به طور کلی نبود کانی‌های رسی، نشان‌گر انرژی بالا و سرعت رسوی‌گذاری آهسته محیط تهشیینی را نشان می‌دهد (شکل ۲-الف).

## روش خوش‌سازی مبتنی بر گراف

در روش خوش‌سازی مبتنی بر گراف، در ابتدا با استفاده از تراکم داده‌ها تعداد خوش‌های بهینه با استفاده از مفهوم شاخص هم‌جواری تعیین می‌شود (Sfidari et al., 2012; 2014). شاخص هم‌جواری از رتبه هر داده نسبت به داده مورد نظر (x) به دست می‌آید. برای مثال رتبه داده y نسبت به x برابر است با:

$$(1) D(y) = \exp(-m/k)$$

که در آن m شماره نقطه به ترتیب فاصله (نزدیک‌ترین نقطه به نقطه مورد نظر شماره یک، نقطه بعدی شماره دو و به همین ترتیب) و k تعداد نقاط مورد بررسی می‌باشد. بدین صورت:

$$(2) S_{\min} = \min_{i=1,N} \{s(x_i)\}, \quad S_{\max} = \max_{i=1,N} \{s(x_i)\}, \quad s(x) = \sum_{n=1}^k \delta(x)$$

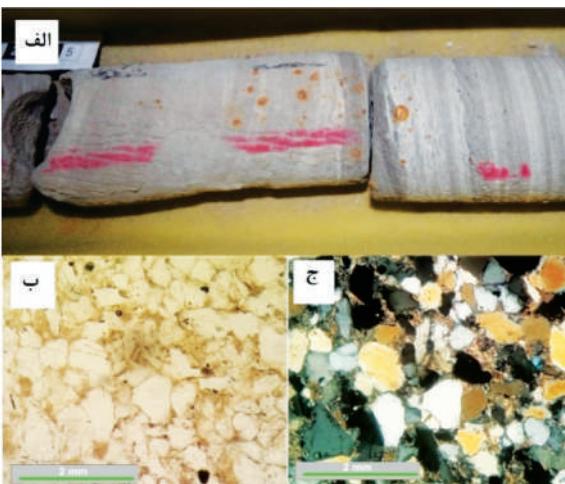
$$(3) NI_{(x)} = S(x) - S_{\min} / S_{\max} - S_{\min}$$

با توجه به این که در این روش به جای استفاده از فاصله مطلق از رتبه سایر داده‌ها استفاده می‌شود، شاخص هم‌جواری به تراکم داده‌ها در اطراف داده مورد نظر بستگی دارد. با استفاده از عدد مربوط به شاخص هم‌جواری، "شاخص نمایانگر مت مرکز" برای دو خوش‌سازی معرفی می‌شود.

$$(4) KRI(x) = m * NI(x) * D(x,y)$$

که در آن D(x,y) فاصله بین دو نقطه x و y در داخل خوش‌سازی می‌باشد. در روندی کلی کاهشی KRI در مقایسه

ماسهٔ خیلی ریز تا خیلی درشت متغیرند و وجود خمیره رسی همراه با ذرات در اندازهٔ سیلت یک طیف پیوسته از ذرات از اندازهٔ رس تا ماسهٔ خیلی درشت را در این رخساره شکل می‌دهد. این طیف وسیع ذرات منجر به جورشدنگی بد در این رخساره شده است. ذرات کوارتز از نظر شکل گرد شده تا نیمهٔ زاویه‌دار هستند. پیوستگی ذرات از نظر اندازه، جورشدنگی و گردشدنگی نشان از ارتباط زیشی آنها دارد. در مطالعات ماکروسکوپی بر روی مغزه این رخساره ماسه‌سنگ گری وکی است و اندازهٔ دانه‌های آنها از خیلی ریز تا خیلی درشت تغییر می‌کند و دارای مقادیر قابل توجهی خمیره رسی و سیلتی است. حضور مقادیر زیاد خمیره رسی باعث رنگ تیره‌تر آن در مقایسه با رخسارهٔ قبلی (PF1) شده است. حضور زیاد خمیره نشان دهندهٔ انرژی پایین‌تر محیط رسوب‌گذاری آن نسبت به رخساره قبلی می‌باشد. طبقه‌بندی مورب غالب‌ترین ساخت رسوبی این رخساره است و عموماً از نوع کم شیب است (شکل ۳-الف)، بنابراین جریان‌های ایجاد‌کننده این رخساره یک طرفه و با انرژی کمتر نسبت به رخساره قبلی است. وجود لامینه‌های شیلی در مواردی لایه‌بندی فلاسر در آن ایجاد کرده است و نشانگر دوره‌های آرامش جریان در محیط است. از مجموعه این مطالب می‌توان شرایط رسوب‌گذاری در اثر جزر و مد را برای محیط رسوب‌گذاری آن نتیجه گرفت.



شکل ۳. الف) ساخت طبقه‌بندی مورب همراه با لامینه‌های گل در رخساره ماسه گری وکی، ب) تصویر میکروسکوپی از رخساره کوارتز وکی با کوارتز نیمهٔ زاویه‌دار تا نیمهٔ گرد و زمینه کانی‌های رسی نور طبیعی و خ) نور پلاریزه

در بررسی‌های ماکروسکوپی شامل ذرات کوارتزی در اندازهٔ ماسه ریز تا شن است. گاه لامینه‌های شیلی در بین این افق‌های ماسه‌های دیده می‌شود و کنده شدن این لامینه‌ها قطعات گلی را به وجود آورده است و گاهی همراه لامینه شیلی درون ماسه‌سنگ‌های این رخساره دیده می‌شوند (شکل ۲-ب). ساخت رسوبی متداول در این رخساره شامل لایه‌بندی مورب با شیب کم است (شکل ۲-ج) و در مواردی با حضور کانی‌های سنگین در سطوح لامینه‌ها به راحتی قابل مشاهده است. این موضوع نشان دهندهٔ شرایط ساحلی می‌باشد. از دیگر ساختهای این رخساره می‌توان به لایه‌بندی موازی اشاره کرد. همچنانی در مواردی که لامینه‌های شیلی حضور دارند با ماسه‌سنگ‌ها لایه‌بندی فلاسر تشکیل داده‌اند (شکل ۲-د) و محیطی با انباشت رسوب متنوع و نوسان انرژی قابل توجه را دلالت می‌کنند. سطح فرسایشی در بخش‌هایی از این رخساره ماسه‌سنگی به‌ویژه در مرز بین افق‌های ماسه‌های و شیلی دیده می‌شود.



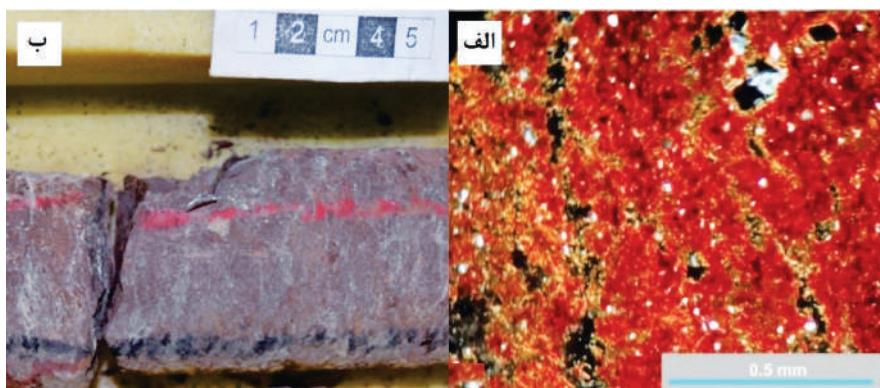
شکل ۲. الف) ساخت لایه‌بندی مورب در رخساره ماسه‌سنگی، ب) تصویر ماکروسکوپی از رخساره ماسه‌سنگی، حضور قطعات شیلی داخل ماسه‌سنگ، ج) رخساره کوارتز آرنایت، دانه‌های چارچوب‌ساز کوارتز با گردشدنگی خوب و سیمان سیلیسی هم محور می‌باشد (نور پلاریزه)، د) رخساره ماسه‌سنگی که در آن تنابوب لایه‌های ماسه‌ای و لامینه‌های ظرفی شیل به‌خوبی مشخص است

**رخساره ماسه گری وکی (PF2)** به صورت کوارتزی کوئی با خمیره متفاوت رسی است (شکل ۳-الف). در بعضی از موارد دانه‌های کوارتز در خمیره رسی شناور هستند و در مواردی نیز خمیره فضای بین دانه‌های کوارتز را پر کرده است (شکل ۳-ب و ج). دانه‌های کوارتز از نظر اندازه از

رسنگ تا سیلیستون و سیلیستون ماسه‌ای، می‌توان گفت انرژی محیط رسوب‌گذاری در آن در حال تغییر است و شرایط مشابه دشت سیلانی هستند.

در بررسی مشخصات ماکروسکوپی این رخساره جزء رخساره‌های دانه‌ریز طبقه‌بندی می‌شود. در بعضی از موارد، تنابوب گل و ماسه به آن ماهیت فلاسر داده است (شکل ۴-ب). این ساخت نشان دهنده زیر محیط جزو مردمی با برتری نهشته‌های گلی است. مهم‌ترین شاخصه این رخساره رنگ قهوه‌ای و فراوانی قطعات آواری گل در آن است.

**رخساره گلسنگ قرمز (PF3)** در مطالعات میکروسکوپی به صورت رسنگ و سیلیستون‌هایی است که با نسبت‌های متفاوتی باهم اختلاط یافته‌اند. حضور اکسیدهای آهن رنگ قرمز به آن داده است (شکل ۴-الف). در برخی رسنگ‌ها دانه‌های پراکنده سیلت و گاه ماسه‌ریز و خیلی ریز مشاهده می‌شود، فراوانی‌های مختلفی دارند. سیلیستون‌های نیز چنین وضعیتی مشاهده می‌شود به‌گونه‌ای که گاه وجود ماسه‌های ریز و خیلی ریز پراکنده ماهیت سیلیستون ماسه‌ای ایجاد کرده است. با توجه به تغییرات بافتی در این رخساره از



شکل ۴. الف) تصویر میکروسکوپی از پتروفاسیس رسنگ حاوی کوارتز (نور پلاریزه)، ب) تصویر ماکروسکوپی از رخساره گلسنگ قرمز با فراوانی قطعات آواری گل در آن، سازند فراقان

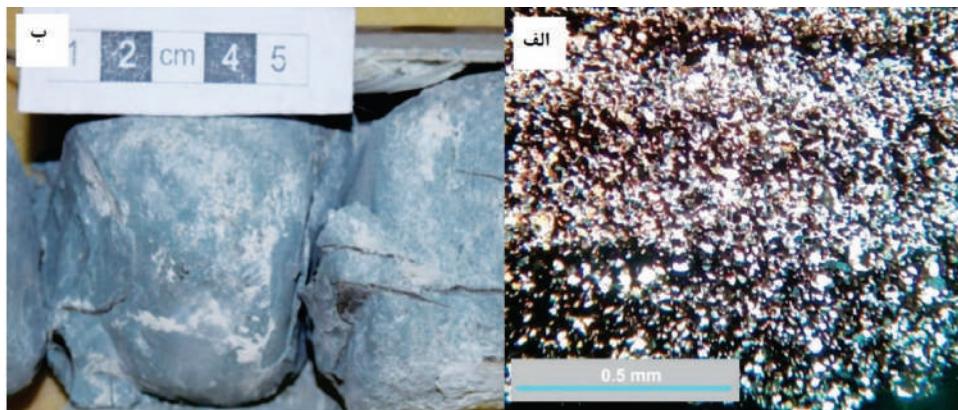
دیاژنزی بعدی دارد.

**رخساره سنگ آهک (PF5)** حاوی گلسنگ آهکی است که نسبت به رخساره‌های قبلی فراوانی کمتری دارد. در زیر میکروسکوپ به صورت مادستون آهکی مشاهده می‌شود. طی تدفین عمیق تبلور مجدد یافته و درشت بلور شده است. در برخی مقاطع درون گلسنگ‌های آهکی بلورهای ریز و پراکنده کوارتز وجود دارند. با توجه به سنگ‌شناسی این رخساره می‌توان آن را به بخش‌های دور از ساحل نسبت داد که در اثر جریان‌های آواری نبوده است (شکل ۶).

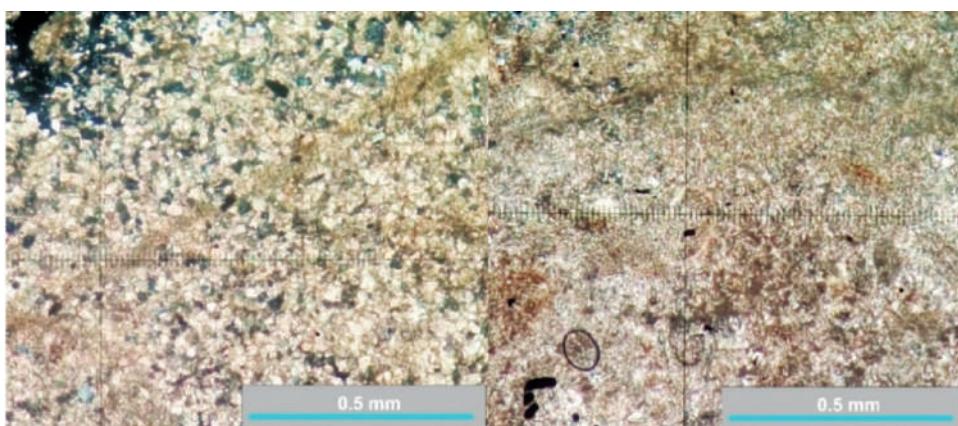
**رخساره سنگ مختلط (PF6)** شامل سنگ‌های آهکی می‌شود که بیش از ۳۰ درصد دانه‌های آواری کوارتز دارند و در مطالعات مغزه بسیار شبیه ماسه‌سنگ است به‌گونه‌ای که تمایز آن‌ها گاهی مشکل است. بخش کربناته آن بیشتر گل کربناته است و سپس طی دیاژنز تبلور مجدد یافته و درشت بلور شده است. حضور دانه‌های آواری کوارتز درون گل‌های آهکی دلالت بر کم‌عمق بودن رخساره بیان شده

**رخساره شیل سیاه و سبز (PF4)** در زیر میکروسکوپ به صورت رسنگ و سیلیستون‌های خاکستری تا سیاه رنگ دیده می‌شود. در واقع دانه‌های پراکنده سیلتی در رس و ذرات در اندازه ماسه کوارتزی در سیلیستون به آن‌ها ماهیت رس سیلتی و سیلت‌های ماسه‌ای داده است (شکل ۵-الف). این رخساره در محیطی با انرژی پایین نهشته شده است. این رسوبات با وجود آواری بودن در یک محیط احیا نهشته شده‌اند، می‌توان آن را به محیط‌های دریایی دور از ساحل و یا شرایط محیطی نیمه بسته مانند لagon نسبت داد.

در مشاهدات مغزه به صورت شیل‌هایی است که برخلاف رخساره قبلی رنگ آنها سبز و سیاه می‌باشد (شکل ۵-ب). رنگ سبز و سیاه شیل‌ها دلالت بر نبود اکسیژن برای اکسیداسیون مواد آلی (مواد آلی و  $\text{Fe}^{2+}$ ) دارد. بنابراین، شیل‌ها در محیطی احیایی تهنشین شده‌اند و در آن آهن‌های دو ظرفیتی سپس در شکل‌گیری پیریت شرکت کرده‌اند. این رخساره دلالت بر شرایطی احیا در محیط رسوبی و محیط



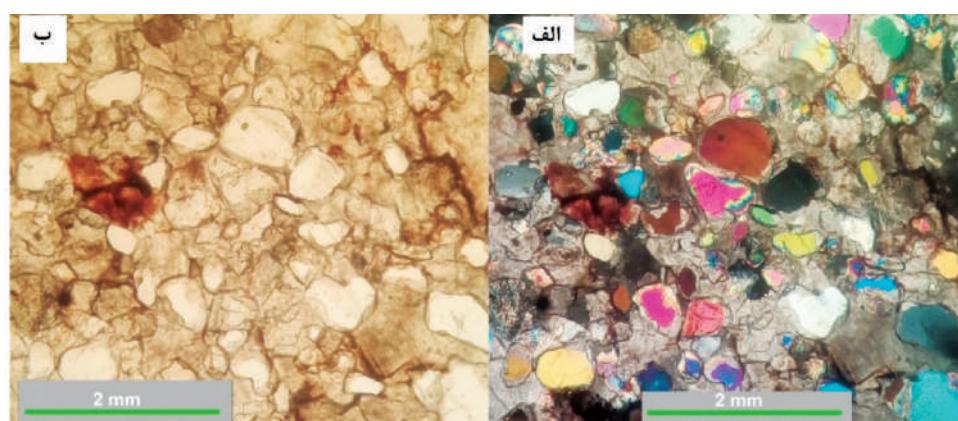
شکل ۵. (الف) تصویر میکروسکوپی از رخساره سیلیستون، (ب) ذرات سیلیتی کوارتز در زمینه کانی های رسی و بلورهای ریز پیریت های در جازا (بخش های تیره)، (نور پلاریزه)، تصویر مغزه نهشته شیلی سازند فراقان



شکل ۶. تصویر میکروسکوپی از گلسنگ آهکی، بخشی از آن توسط گلسنگ کربناته تبلور مجدد یافته و درشت بلور شده است

محیطی شده‌اند که رسوبات کربناته (عمدتاً گلسنگ کربناته) در حال تهنشست بوده است. در اکثر موارد، دانه‌های کوارتز با گرد شدگی خوب در زمینه بلورهای درشت سیمان کربناته شناور هستند (شکل ۷).

دارد. به نظر می‌رسد رخساره بیان شده در بخش دور از ساحل تشکیل شده و به بطور متناوب از خشکی تعذیه شده است. سنگ‌های مختلط در آن دارای دو منشاء آواری و شیمیایی است. دانه‌های کوارتز با منشاء آواری وارد



شکل ۷. (الف) تصویر میکروسکوپی از رخساره سنگ‌های مختلط در نور پلاریزه، (ب) دانه‌های کوارتز در زمینه میکرایتی بهصورت شناور هستند و بعدها طی دیاژنز تبلور مجدد یافته است (نور طبیعی)

**مجموعه رخسارهای زیر محیط تدریجی** این مجموعه از رخسارهای شیلی (PF4) و ماسه‌ای (PF1) تشکیل شده است. مشخصات رسوب‌شناسی آن معرف زیر محیط زون گذر تدریجی به محیط‌های دور از ساحل است. به صورتی که بیشترین ضخامت این مجموعه شامل شیل‌ها و مقدار کمتر رخسارهای ماسه‌ای می‌باشد (شکل ۸).

**مجموعه رخسارهای زیر محیط دور از ساحل** این مجموعه رخسارهای از رخسارهای کربنات (PF5) و مختلط (PF6) تشکیل شده است و نشان‌دهنده محیطی عمیق با گردش جریان محدود است. با توجه به مشخصات رسوب‌شناسی و همبستگی رخساره‌ها، این مجموعه می‌تواند در گستره دور از ساحل، رسوب‌گذاری کند. رخساره مختلط به دلیل ورود ماسه‌ها به این زیر محیط تشکیل شده‌اند (شکل ۸).

## رخسارهای لاغ

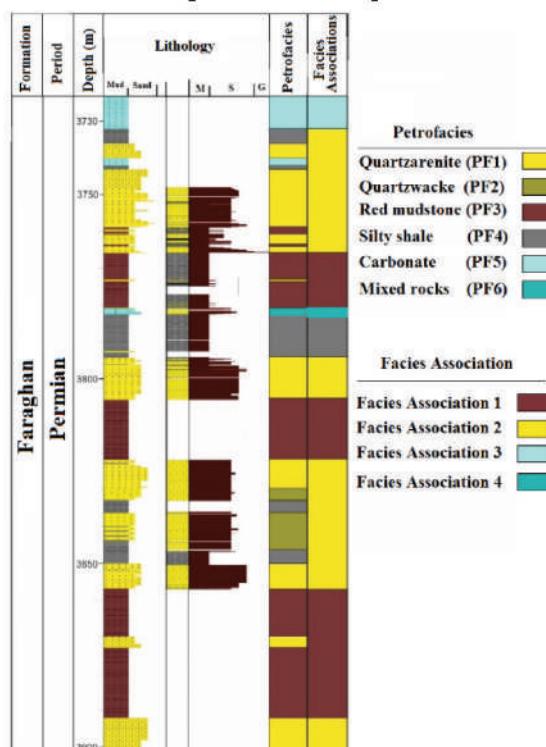
در یک ارزیابی خوش‌آیی، اولین مرحله انتخاب متغیرهای است که قرار است با سنجش فاصله آنها در ابعاد مختلف (ابعاد داده‌ها برابر با تعداد متغیرها) خوش‌سازی انجام شود (Kalhori et al., 2024). در این مطالعه لاغ‌هایی که بیشترین تاثیر را از سنگ‌شناسی، محیط رسوبی و کیفیت مخزنی داشته‌اند به عنوان ورودی‌های خوش‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بنابراین نگاره‌ای گاما به دلیل تاثیرپذیری از محیط رسوبی و حجم شیل، نگاره‌ای تخلخل شامل نوترون، چگالی و صوتی برای شناسایی سنگ‌شناسی و تخلخل و همچنین نگار فتوالکتریک برای شناسایی سنگ‌شناسی در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مرحله بعد از انتخاب ورودی‌ها، انتخاب خوش‌بهینه می‌باشد. اگر تعداد ورودی‌ها محدود باشد، می‌توان با پلات‌های متقطع دو بعدی و سه‌بعدی و مقایسه آنها با هم‌دیگر، توزیع فضایی داده‌ها را مشخص و تعداد خوش‌بهینه را انتخاب کرد، ولی اگر تعداد متغیرهای ورودی بیش از سه مشخصه باشد، دیگر نمی‌توان از این پلات‌های متقطع برای مشخص شدن توزیع فضایی داده‌ها استفاده کرد. در این حالت روش‌های مختلفی وجود دارد که به کمک آنها و با محاسبه فاصله داده‌ها در ابعاد مختلف و با الگوریتم‌های

## مجموعه‌های رخسارهای

رخسارهای معرفی شده در چهار زیرمجموعه محیطی با عنوان مجموعه‌های رخسارهای در ادامه تفصیل شده‌اند.

**مجموعه رخسارهای زیر محیط دشت ساحلی** این مجموعه رخسارهای از رخسارهای گلسنگ قرمز (PF3) و ماسه‌سنگ (PF1-PF2) تشکیل شده است. نهشته‌های قرمز-قهوه‌ای رنگ از یک محیط اکسیدان حکایت دارند و نشان‌دهنده رخنمون یافتن رسوبات است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، این مجموعه رخسارهای به دشت ساحلی نسبت داده می‌شود (شکل ۸).

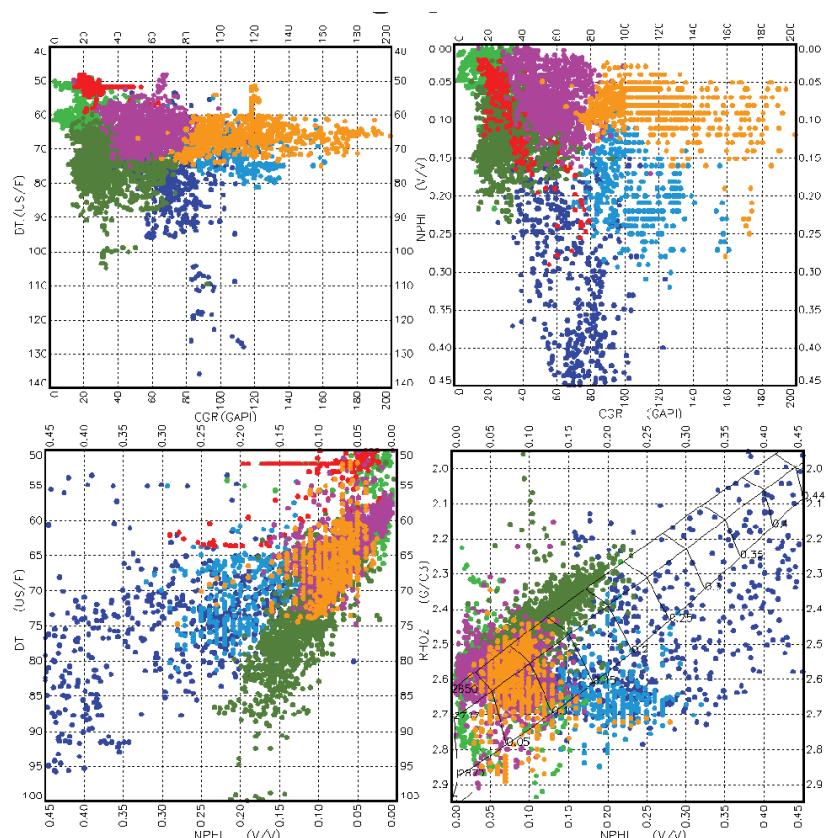
**مجموعه رخسارهای زیر محیط ساحلی** این مجموعه از رخسارهای شیل (PF4) و ماسه‌سنگ (PF1-PF2) تشکیل شده است. حضور رخساره ماسه‌سنگی از نوع کوارتز آرنایت که نشان‌دهنده انرژی بالای محیط می‌باشد و لامینه‌های شیل (معرف شرایط آرام)، شرایط محیط ساحلی برای آن پیشنهاد می‌شود. رخساره کوارتز و کی در حدفاصل کوارنز آرنایتها و شیل‌ها نهشته شده است (شکل ۸).



شکل ۸. ستون سنگ‌شناسی، رخسارهای و مجموعه‌های رخسارهای سازند فراقان

دیگر رسید و ادامه کار را بر اساس آن انجام داد. در آخر پس از انتخاب تعداد خوش‌های بهینه در چاه مغزه‌دار، خوش‌سازی بر اساس روشی که در بالا توضیح داده شد انجام گرفت. تصاویر متقطع دو بعدی خروجی حاصل از خوش‌سازی در شکل ۹ نشان داده شده است. همچنان خدول ۱ سنگ‌شناسی، تخلخل مفید حاصل از ارزیابی‌های پتروفیزیکی، میانگین هر یک از متغیرهای ورودی برای خوش‌سازی و رنگ اختصاص داده شده برای هر رخساره در این مطالعه و در ادامه کار را نشان می‌دهد.

مشخص می‌توان تعداد خوش‌های بهینه را انتخاب کرد. در این مطالعه بر اساس تلفیقی از روش‌های مختلف و با در نظر گرفتن ویژگی‌های زمین‌شناسی سازند مورد مطالعه شش خوش‌به عنوان تعداد خوش‌های بهینه انتخاب شد. از طرف دیگر روش خوش‌سازی تفکیکی مبتنی بر گراف، شماره‌های خاصی را به عنوان تعداد خوش‌های بهینه پیشنهاد می‌دهد. بنابراین می‌توان با در نظر گرفتن توزیع و پراکندگی داده‌ها در گروه‌های مختلف تعداد خوش‌های را با هم ترکیب کرد تا به عدد مورد نظر (شش خوش) به دست آمده از روش‌های



شکل ۹. رسم دو بعدی نگار گاما در مقابل سرعت صوت (بالا چپ)، گاما در مقابل نوترنون (بالا راست)، تخلخل نوترنون در مقابل سرعت صورت (پایین سمت چپ) و نوترنون در مقابل چگالی (پایین سمت راست) در تمام چاهها به صورت پیوسته

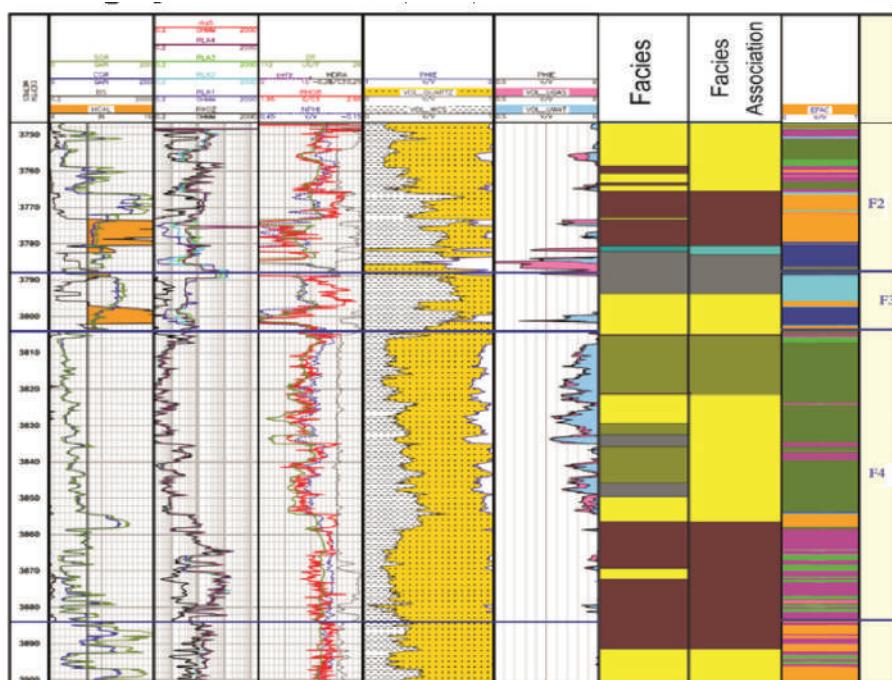
جدول ۱. سنگ‌شناسی، تخلخل مفید، میانگین متغیرهای ورودی خوش‌سازی و رنگ اختصاص داده شده به رخساره

Facies	COLOR	Lithology	GR	DT	NPHI	RHOB	(/) PHIE	Petrofacies
Facies_1		lime	۲۱/۱۷	۵۷/۵۳	.۰۴	۲/۶۲	.۰۴	PF-5
Facies_2		Sand, Shale	۳۴/۷۰	۷۴/۷۰	.۱۲	۲/۴۲	.۱۲	PF-1
Facies_3		Sand Shale	۵۵/۷۹	۶۴/۵۱	.۰۷	۲/۵۹	.۰۰۴	PF4
Facies_4		Shale, Sand	۶۹/۰۸	۷۷/۶۸	.۳۱	۲/۳۱	.۱۰	PF-2
Facies_5		Shale	۱۰۵/۴۷	۷۰/۶۰	.۱۹	۲/۶۴	.۰۰۳	PF-4,6
Facies_6		Read Shale	۱۱۶/۳۰	۶۶/۰۵	.۰۸	۲/۶۲	.۰۰۸	PF-3

نازک حاصل از خرددهای حفاری مشخص شده‌اند را نشان می‌دهد. انطباق خوبی بین رخساره‌های لاغ استخراج شده و رخساره‌های مغزه دیده می‌شود. از طرف دیگر می‌توان بین زیر محیط‌های مشخص شده در چاه A و رخساره‌های لاغ انطباق خوب مشاهده کرد. در ادامه با توجه به انطباق قابل قبول بین رخساره‌های استخراج شده از لاغ با مغزه، می‌توان در بقیه چاه‌های موجود از میادینی که تا فراقان حفاری شده‌اند و دارای لاغ چاه پیمایی هستند ولی فاقد داده مغزه می‌باشند روش ارائه شده را گسترش داد. در ادامه لاغ‌های چاه‌پیمایی موجود از هر چهار چاه به صورت یک فایل واحد درآمده و روش معرفی شده بر روی آنها اجرا شد.

شکل ۱۲ نتیجه انطباق حاصل از رخساره‌های لاغ را در چهار چاه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

در مرحله بعد بین رخساره‌های لاغ استخراج شده و رخساره‌های زمین‌شناسی در چاه مغزه‌دار انطباق برقرار شد. بر اساس انطباق انجام شده در اکثر موارد رخساره لاغ شماره یک با لیتو‌لوژی کربناته معادل رخساره زمین‌شناسی پنج و شش (رخساره سنگ‌آهک و رخساره مختلط)، رخساره‌های لاغ شماره دو و سه با لیتو‌لوژی شیل و شیل ماسه‌ای معادل رخساره زمین‌شناسی چهار (شیل سیاه و سبز)، رخساره لاغ چهار با لیتو‌لوژی ماسه معادل رخساره زمین‌شناسی یک (رخساره ماسه‌سنگی) رخساره لاغ شماره پنج با لیتو‌لوژی شیل ماسه ای معادل رخساره زمین‌شناسی شش (رخساره گل‌سنگ قرمز) می‌باشند. شکل ۱۰ این انطباق را در چاه مغزه‌دار و شکل ۱۱ این انطباق را در چاهی که رخساره‌های زمین‌شناسی بر اساس مقاطع

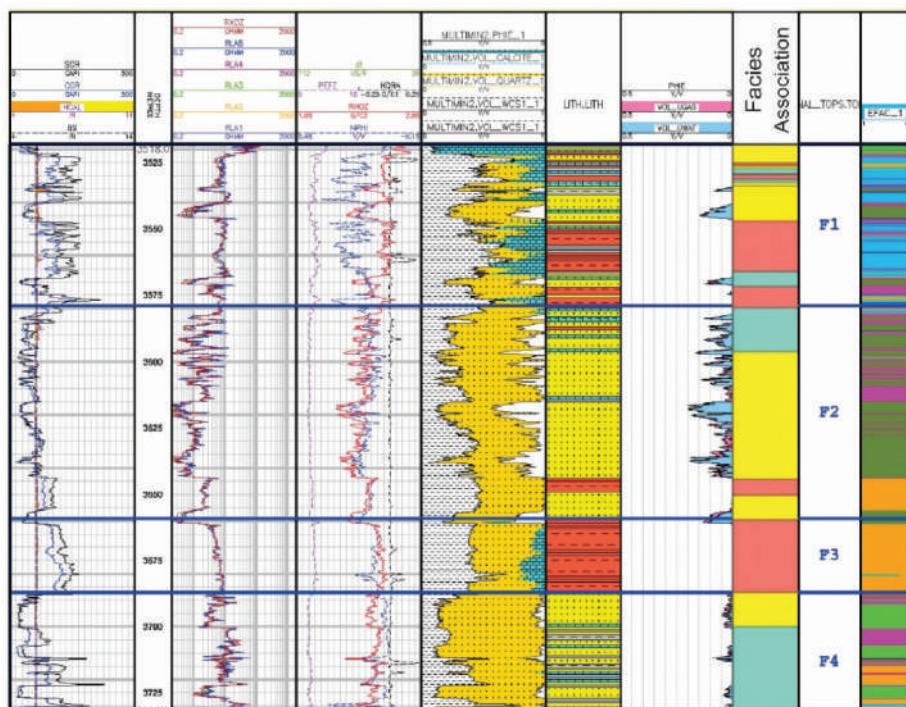


شکل ۱۰. انطباق بین رخساره‌های زمین‌شناسی با رخساره‌های لاغ استخراج شده از لاغ‌های چاه‌پیمایی در چاه A

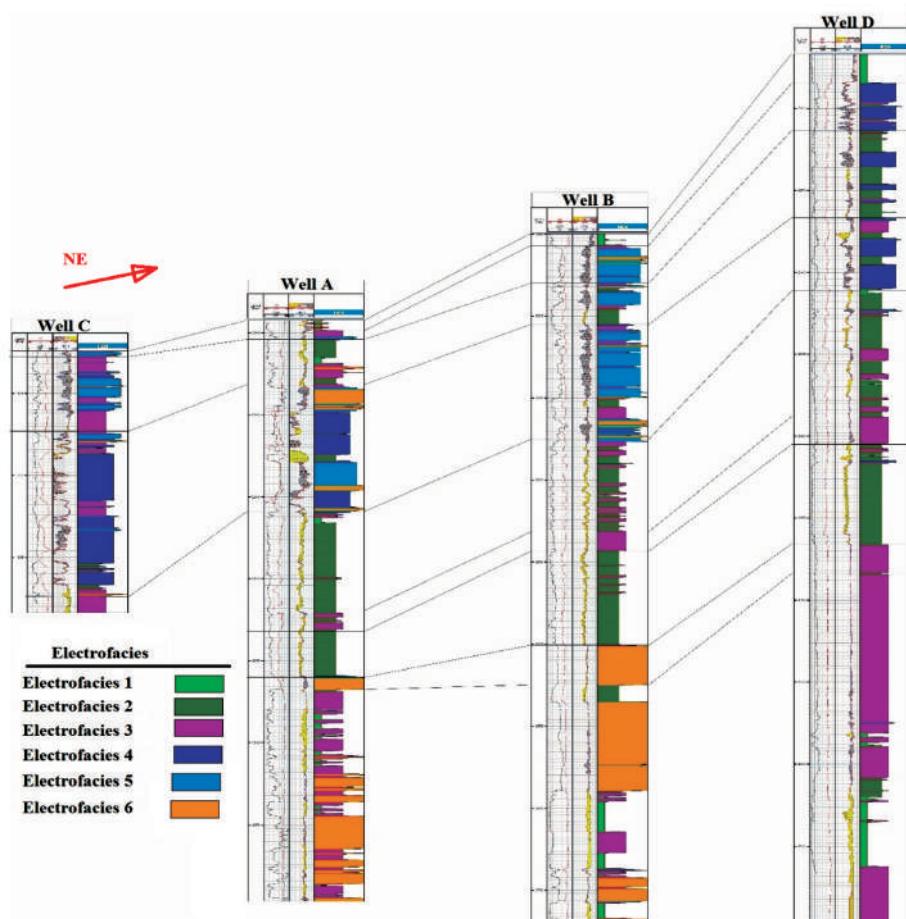
### کیفیت مخزنی رخساره‌های معرفی شده

انطباق دو بعدی رخساره‌ها در شکل ۱۲ نشان داده مناسبتری نسبت به بقیه رخساره‌های شناسایی شده برخوردار می‌باشند. میانگین تخلخل مفید برای رخساره‌های استخراج شده در شکل ۱۴ دیده می‌شود. بر اساس شکل ۱۴، این مقدار برای رخساره‌های دو و چهار بالاتر از ۱۰ درصد می‌باشد.

انطباق دو بعدی رخساره‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. شکل ۱۳ نمودار دو بعدی آب اشباع شدگی در مقابل تخلخل حاصل از نتایج ارزیابی پتروفیزیکی را برای رخساره‌های معرفی شده نشان می‌دهد. بر اساس مشاهدات موجود، رخساره‌های دو و چهار از کیفیت مخزنی

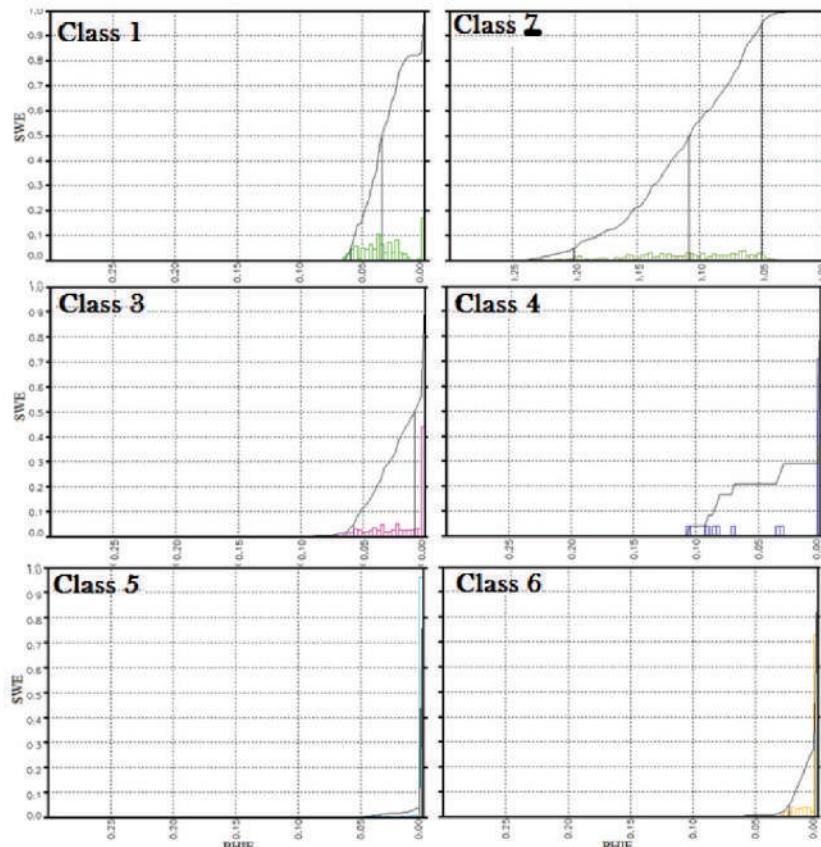


شکل ۱۱. انطباق بین رخساره‌های زمین‌شناسی با رخساره‌های لگ استخراج شده از لگ‌های چاپیمابی در چاه B

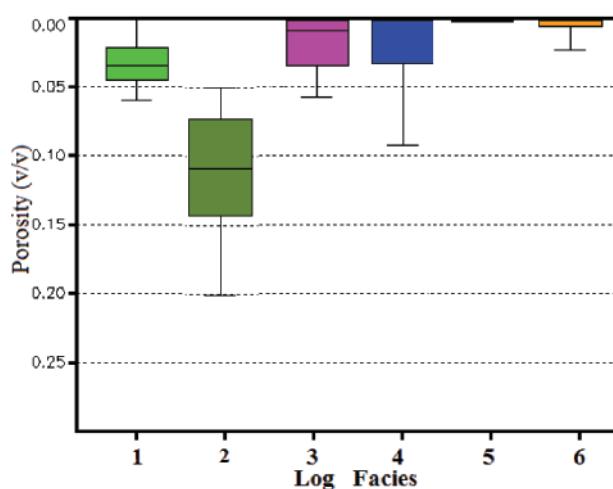


شکل ۱۲. انطباق بین رخساره‌های لگ استخراج شده از لگ‌های چاپیمابی در چهار چاه حفاری شده تا سازند فرآقان

و چهار در زون‌های یک و دو سازند فراقان یعنی زونی که رخساره زمین‌شناسی ماسه‌سنگی کوارتز آرناتی گسترش دارد از فراوانی بالایی برخوردار می‌باشند. بنابراین بهترین زون مخزنی در تمام چاهها در سازند فراقان را می‌توان زون دو و بعد از آن زون یک در نظر گرفت.



شکل ۱۳. نمودار گستره تغییرات تخلخل مفید در مقابل آب اشباع شدگی در رخساره‌های مختلف در چاه SPD1-14



شکل ۱۴. گستره تغییرات تخلخل مفید در رخساره‌های لاغ معرفی شده در چاه‌های مورد مطالعه

## سپاسگزاری

نویسنندگان از شرکت نفت و گاز پارس برای اجازه انتشار نتایج این تحقیق و همچنین پژوهشکده علوم پایه کاربردی به خاطر حمایت‌های مالی تشکر فراوان دارند.

## منابع

- امرائی، ج.، رضایی، پ.، امینی، ع.، زمان زاده، س.م. و توکلی، و.، ۱۳۹۷. تحلیل ریزخساره‌ها و پتروفاسیس‌ها، ویژگی‌های دیاژنتیکی و شرایط محیطی سازند فracan در بخش مرکزی خلیج‌فارس. *فصلنامه زمین‌شناسی ایران*, ۱۳، (۵)، ۲۳-۱۵.
- مهدی‌نیا، م. و موسوی‌حرمی، س.ر.، ۱۳۸۸. پتروگرافی و تفسیر محیط رسویگذاری نهشته‌های پرمین پیشین (سازند فracan) در میدان گلشن در خلیج‌فارس. *رسوب و سنگ رسویی*, ۶، ۲-۱۱.
- Al-Dajani, A., Burns, D., Toksoz, M.N. and Saggaf, M., 2000, August. Aeolian and fluvial depositional systems discrimination in wireline logs: Unayzah formation, Central Saudi Arabia. In SEG International Exposition and Annual Meeting (SEG-2000). SEG.
- Al-Ghazi, A., 2007. New evidence for the Early Devonian age of the Jauf Formation in northern Saudi Arabia. *Revue de Micropaleontologie*, 50, 59-72.
- Birkle, P., Van Dijk, C., Dasgupta, K., Murphy, M.J., Kharaka, Y.K., Thordsen, J.J. and Bischoff, J.L., 2019. Controls on illite cementation in Unayzah sandstones, Saudi Arabia: mineralogy, K-Ar dating, numerical modeling, and hydrothermal experiments. *Journal of Sedimentary Research*, 89(2) 89-109.
- Ghavidel-Syooki, M., 1988. Palynostratigraphy and Palaeoecology of the Faraghan Formations of Southeastern Iran. Ph.D. Theses. Michigan State University. 279.
- Ghavidel-Syooki, M., 1993. Palynological Study of Paleozoic Sediments of the Chal-I-Sheh Area, Southwestern Iran. *Journal of Sciences. Islamic Republic of Iran*, 4, 1, 32-45.

## نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی رسوب‌شناسی و تعیین رخساره‌های رسویی سازند فracan در چهار چاه حفاری شده تا این سازند در میادین خلیج‌فارس پرداخته است. با استفاده از مطالعات مغزه، مقاطع نازک و خردنهای حفاری شش رخساره ماسه‌سنگ، ماسه‌گری وکی، گلسنگ قرمز، شیل سیاه و سبز، سنگ آهک و رخساره سنگ مخلوط در چهار محیط رسویی دشت ساحلی، محیط ساحلی، تدریجی و دور از ساحل برای این سازند معرفی شد.

بر اساس روش خوش سازی مبتنی بر گراف شش رخساره لاغ در چاه مغزه‌دار و دارای لاغ چاه پیمایی معرفی شد. بین رخساره‌های لاغ معرفی شده و رخساره‌های زمین‌شناسی در چاه مغزه‌دار انطباق برقرار شد. انطباق نتایج حاصل از رخساره‌های لاغ با رخساره‌های رسویی و همراهی رخساره‌ها نشان می‌دهد، رخساره لاغ یک دارای سنگ‌شناسی آهکی، رخساره لاغ دو سه ماسه‌ای، رخساره لاغ چهار ماسه حاوی شیل، رخساره پنج شیلی و رخساره شش حاوی شیل‌های قرمز رنگ می‌باشد.

روش ارائه شده برای تعیین رخساره‌های لاغ به چاه‌های حفاری شده تا سازند فracan دارای لاغ چاپیمایی و فاقد مغزه گسترش داده شد و در بقیه چاه‌ها رخساره‌های لاغ معرفی شد. گسترش رخساره‌های لاغ به چاه‌های فاقد مغزه حفاری شده در سازند فracan نشان از تغییرات فراوانی این رخساره‌ها دارد که نشان‌دهنده تغییر جانبی محیط رسویی سازند فracan است.

با استفاده از نتایج ارزیابی‌های پتروفیزیکی کیفیت مخزنی رخساره‌های معرفی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی کیفیت مخزنی رخساره‌ها نشان داد، رخساره لاغ دو و چهار دارای بهترین کیفیت مخزنی می‌باشند. رخساره‌های مذکور در بخش‌های فracan دو (F2) و فracan یک (F1) دارای بیشترین فراوانی می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بهترین بازه از نظر کیفیت مخزنی در سازند فracan به زون‌های دو و یک سازند اختصاص دارند.

- Ghavidel-Syooki, M., 1995. Palynostratigraphy and palaeogeography of a Palaeozoic sequence in the Hassanakdar area, Central Alborz Range, northern Iran. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 86(1-2), 91-109.
- Ghavidel-Syooki, M. 1997., Palynostratigraphy and Paleogeography of Early Permian Strata in the Zagros Basin, Southeast-Southwest Iran. *Journal of Sciences. Islamic Republic of Iran*, 8, 4, 243-261.
- Ghavidel-Syooki, M., 2003. Palynostratigraphy of Devonian sediments in the Zagros Basin, southern Iran. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 127(3-4), 241-268.
- Kalhori, M., Mehrabi, H., Sfidari, E. and Khiabani, S.Y., 2024. Target zone selection for hydraulic fracturing using sedimentological and rock mechanical studies with the support of the machine learning method of cluster analysis. *Geo-energy Science and Engineering*, 237, 212826.
- Kamali, M.R. and Rezaee, M.R., 2003. Burial history reconstruction and thermal modelling at Kuh-e Mond, SW Iran. *Journal of petroleum Geology*, 26(4), 451-464.
- Khodayeva, A., 2024. Assessment of CO<sub>2</sub> Storage Potential in the Unayzah Formation, Central Saudi Arabia (Doctoral dissertation), 185.
- Macdonald, F.A., Smith, E.F., Strauss, J.V., Cox, G.M., Halverson, G.P., Roots, C.F., MacFarlane, K.E., Weston, L.H. and Relf, C., 2010. Neoproterozoic and early Paleozoic correlations in the western Ogilvie Mountains, Yukon. *Yukon Exploration and Geology*, 161-182.
- Mollazal, Y., 1965. The geology of the Kuh-e Neyse and adjoining area. *Iranian Oil Operating Companies Report*, (1098).
- Sfidari, E., Kadkhodaie-Ikhchi, A. and Najjari, S., 2012. Comparison of intelligent and statistical clustering approaches to predicting total organic carbon using intelligent systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 86, 190-205.
- Sfidari, E., Kadkhodaie-Ikhchi, A., Rahipour-Bonab, H. and Soltani, B., 2014. A hybrid approach for litho-facies characterization in the framework of sequence stratigraphy: a case study from the South Pars gas field, the Persian Gulf basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 121, 87-102.
- Szabo, F. and Kheradpir, A., 1978. Permian and Triassic Stratigraphy Zagros basin Southwest Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 1-2, 57-82.
- Zamanzadeh, S.M., Amini, A. and Ghavidel-Syooki, M., 2009. Sequence stratigraphic controls on early-diagenetic carbonate cementation of shallow marine clastic sediments (the Devonian Zakeen Formation, southern Zagros, Iran). *Geosciences Journal*, 13, 31-57.

## تغییرات چینه‌شناسی عضو سیمره در روند جنوب غربی- شمال شرقی زیزون ساختاری لرستان، حوضه زاگرس

ایوب بازوند<sup>۱</sup>، عباس صادقی<sup>(۲)\*</sup>، محمدحسین آدابی<sup>۳</sup>، امیرمحمد جمالی<sup>۴</sup> و نسرین هداوند خانی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری چینه‌شناسی و فسیل‌شناسی، گروه حوضه‌های رسوی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲. استاد گروه حوضه‌های رسوی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۳. استاد گروه حوضه‌های رسوی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۴. دکتری چینه‌شناسی و فسیل‌شناسی، شرکت ملی نفت ایران، مدیریت اکتشاف، تهران، ایران
۵. دکتری چینه‌شناسی و فسیل‌شناسی، گروه حوضه‌های رسوی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

### چکیده

بهمنظر مطالعه و مقایسه چینه‌شناسی عضو سیمره (عضو آهکی لوفا) در یک روند جنوب غربی-شمال شرقی در زیزون لرستان، سه برش چینه‌شناسی از سازند گوری باوی عضو سیمره شامل برش شیخ‌مکان (تاقدیس کبیرکوه)، برش باغ‌گل (تاقدیس سلطان) و برش سیاه‌دره (تاقدیس زنگول) مورد مطالعه قرار گرفتند و سپس با سایر برش‌های مطالعه شده هم‌روند مورد مقایسه قرار گرفتند. آهک سیمره دارای بیشترین ضخامت در نواحی جنوب غربی لرستان است به‌طوری‌که در برش‌های مورد مطالعه، بیشترین ضخامت آن ۴۳ متر و متعلق به تاقدیس کبیرکوه است و سپس به سمت نواحی شمال شرقی به‌تدريج از ضخامت آن کاسته می‌شود به‌طوری‌که برخی از واحدهای سنگی آن نیز دیگر قابل مشاهده نمی‌باشد. این کاهش ضخامت به هشت متر در تاقدیس سلطان، سپس به کمتر از یک متر در تاقدیس زنگول رسیده و در نهایت محو می‌شود. کاهش ضخامت عضو سیمره به سمت شمال شرق لرستان تحت تاثیر حرکات تکتونیکی حوضه فورلند زاگرس است، به‌طوری‌که به‌تدريج به سمت شمال شرق لرستان با افزایش عمق، رسوب‌گذاری این عضو کم‌عمق کاهش پیدا کرده است. سن عضو سیمره براساس زون‌های زیستی شناسایی شده در حد زیرین و بالای آن، در هر سه برش چینه‌شناسی مورد مطالعه کامپانین میانی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آهک لوفا، سازند گوری، تاقدیس سلطان، سنگ چینه‌نگاری.

### مقدمه

غرب ایران گسترش دارد (James and Wynd, 1965). این سازند به‌واسطه دارا بودن خصوصیات سنگ منشأ و پوش‌سنگ از اهمیت قابل توجهی در منطقه زاگرس برخوردار

در حوضه رسوی زاگرس، سازند گوری با لیتولوژی مارنی و سنگ آهک‌های رسی در گستره پهناوری در غرب و جنوب

\* نویسنده مرتبط: Sadeghi@sbu.ac.ir

چهار لیتوزون در آن معرفی کرده‌اند. رزمجویی و همکاران (Razmjooei et al., 2021) برش گنداب واقع در یال جنوبی تاقدیس کبیرکوه، به تحلیل چگونگی تشکیل عضو سیمره پرداخته‌اند و بالاًمدگی حوضه رسوبی و کم‌عمق شدگی سازند گوری در زمان کامپانین را به فشارش صفحه عربی به سمت صفحه ایران نسبت داده‌اند.

تاکنون مطالعات کاملی پیرامون عضو سیمره در ناحیه شمال و شمال شرق لرستان انجام نشده است به همین دلیل این مطالعه به بررسی تغییرات چینه‌شناسی عضو سیمره در زیرزون لرستان و در یک روند جنوب غربی-شمال شرقی در ارتباط با تغییرات حوضه فورلند زاگرس می‌پردازد.

## روش مطالعه

برش شیخ‌مکان در یال شمال شرقی تاقدیس کبیرکوه به مختصات قاعده‌ای  $52^{\circ} 21' 47''$  طول شرقی و  $05^{\circ} 22' 33''$  عرض شمالی، برش باغ‌گل در یال شمال شرقی تاقدیس سلطان واقع در شمال شرق شهر پلدختر به مختصات قاعده‌ای  $51^{\circ} 21' 47''$  طول شرقی و  $13^{\circ} 48' 33''$  عرض شمالی و برش سیاهدره در یال جنوب غربی تاقدیس زنگول به مختصات قاعده‌ای  $44^{\circ} 51' 47''$  طول شرقی و  $34^{\circ} 25' 33''$  عرض شمالی هستند. علاوه بر سه برش چینه‌شناسی مذکور، سه برش چینه‌شناسی شامل برش کاور (همتی نسب، ۱۳۸۷) در یال شمالی تاقدیس اناران، برش سمند واقع در تاقدیس سمند (Hashmie et al., 2020) و برش پاسان (2017) در یال شمالی تاقدیس پاسان که توسط محققین دیگر مطالعه شده‌اند، انتخاب شد که موقعیت جغرافیایی آنها در شکل ۱ نشان داده شده است.

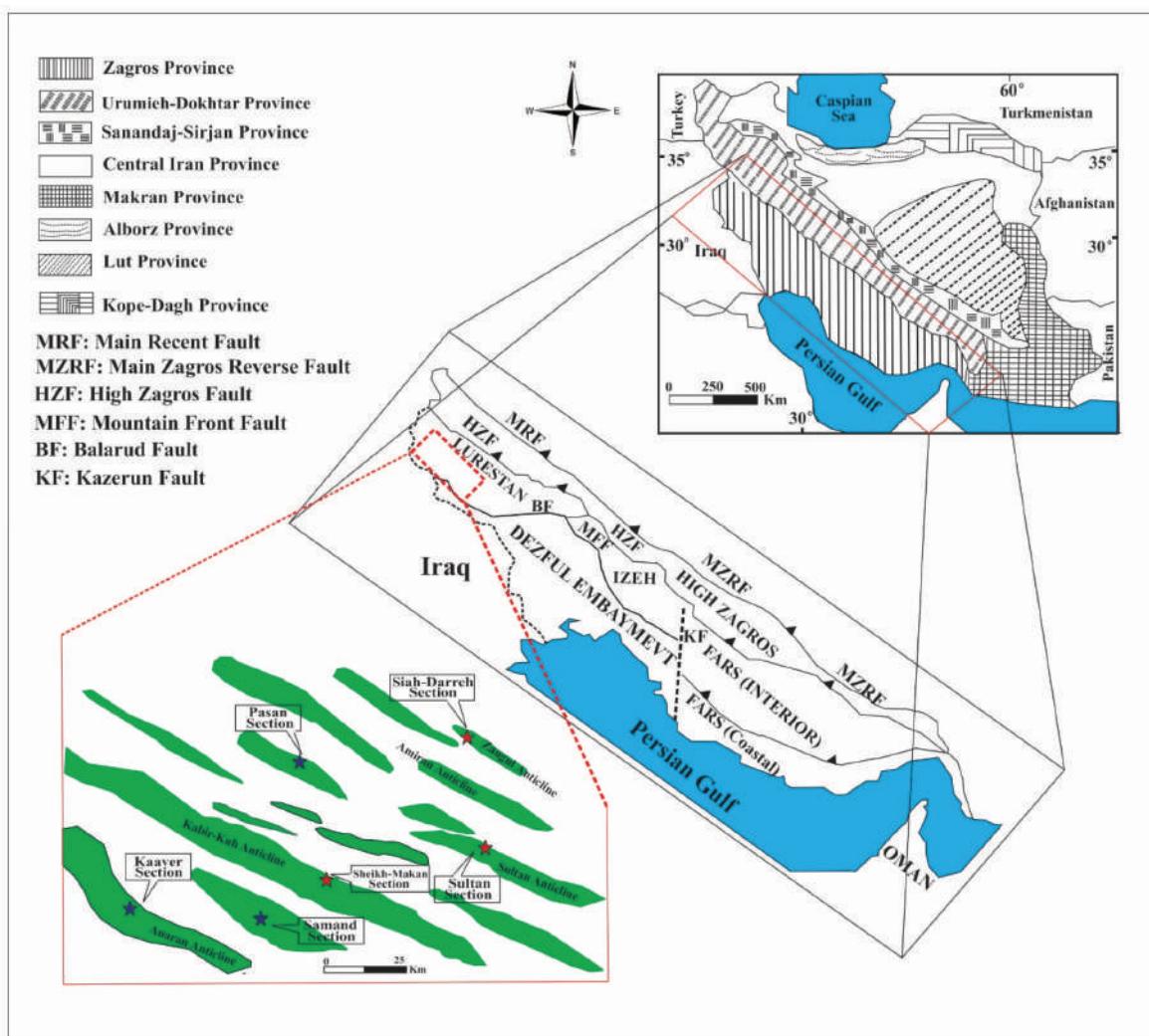
برای مطالعه عضو سیمره در برش‌های مورد مطالعه ابتدا در مطالعه صحراوی به پیمایش سازند گوری و عضو سیمره اقدام و ضمن بررسی خصوصیات چینه‌شناسی و یادداشت‌برداری از آنها، از نمونه‌های سخت و نرم در فواصل یک متري نمونه‌برداری انجام گرفت. در بررسی واحدهای سنگی عضو سیمره، ماکروفسیل‌های این عضو نیز نمونه‌برداری و برای مطالعه و عکس‌برداری به داشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی منتقل شد. برای شناسایی ماکروفسیل‌ها از

است (Stocklin, 1968). سازند گوری در بیشتر نواحی لرستان دارای دو عضو آهکی رسمی با نام‌های سنگ‌آهک سیمره (آهک لوفا) و امام‌حسن است. سنگ‌آهک سیمره فقط در زیرزون لرستان گسترش دارد و در دیگر نقاط زاگرس نظری زیرزون فارس رخنمون ندارد (Stocklin and Setudehnia, 1991) مناطق کم‌عمق نظیر دوکه‌ای، برکیوپود، خارپوست و مرجان است که حاکی از کاهش عمق حوضه رسوبی در بخشی از رسوب‌گذاری سازند گوری می‌باشد. به باور پژوهشگرها این کاهش عمق متأثر از فعالیت‌های تکتونیکی هم‌زمان با نزدیک شدن اقیانوس نئوتیس در حوضه فورلند زاگرس در انتهای دوره کرتاسه است (Van Buchem et al. 2006; Razmjooei et al., 2021) حوضه زاگرس در دوران کرتاسه پسین شاید در مناطق شمال شرقی لرستان واقع شده است (Van Buchem et al. 2006; Homke et al., 2009; Saura et al., 2011; Razmjooei et al., 2021).

قرچایی (۱۳۸۵) در یال شمالی تاقدیس کبیرکوه، دو لایه لوفادر پایینی و بالایی را گزارش نموده است که توسط که یک واحد شیل خاکستری از هم جدا شده‌اند. همتی نسب (۱۳۸۷) در برش کاور واقع در یال شمالی تاقدیس اناران عضو مذکور را به رسوبات حمل شده درون حوضه‌ای نسبت داده و آن را نابرجا معرفی نموده است. بلمکی و همکاران (۱۳۸۹) در برشی واقع در جنوب شرق ایلام ضمن بررسی جغرافیایی دیرینه عضو سیمره و معرفی ۱۰ گونه خارپوست، محیط‌زیست آنها را به عرض‌های جغرافیایی پایین نیم‌کره شمالی و ایالت تیس نسبت داده‌اند. کامیابی و همکاران (Kamyabi et al., 2019) با مطالعه چند برش از سازند گوری واقع در تاقدیس کبیرکوه، ۲۱ گونه متعلق به ۱۴ جنس از خارپوست‌ها را در عضو سیمره با سن کامپانین شناسایی و معرفی نمودند. هاشمیه و همکاران (Hashmie et al., 2020) در هفت برش چینه‌شناسی از سازند گوری واقع در جنوب و جنوب غرب ناحیه لرستان به مقایسه عضو سیمره پرداختند و از لحاظ لیتواستراتیگرافی در اکثر برش‌های مذکور

(Postuma, 1989)، پوستوما (Bolli et al., 1971) و السون و همکاران (Olsson et al., 1999) استفاده شد. نتایج حاصل از سه برش مورد مطالعه با دیگر برش‌های چینه‌شناسی موجود در گستره مورد مطالعه، مورد مقایسه قرار گرفتند.

(Kroh and Smith, 2010) و اسمیت و رایت (Smith and Wright, 2003) استفاده شد. برای بررسی جایگاه سنی عضو سیمره و همچنین سازند گوری براساس فرامینیفرهای پلانکتونی از منابعی چون لوبلیخ و تاپان (Loeblich and Tappan, 1988)، پرمولی (Premoli Silva and Verga, 2004)، بولی (Böhlke and Verga, 1988) و ورگا (Verga, 2004) است.



شکل ۱. موقعیت برش‌های چینه‌شناسی مورد مطالعه در این پژوهش (علامت ستاره قرمز) و برش‌های مورد مقایسه قرار گرفته هم‌جوار (علامت ستاره آبی) در نقشه زون‌های ساختاری اصلی ایران، نقشه زون‌ها برگرفته از 2008 Heydari با تغییر

سنگ‌شناسی دارای خصوصیات زیر می‌باشند.

## نتایج

### الف- عضو سیمره در برش شیخ مکان:

عضو سیمره در برش چینه‌شناسی شیخ مکان براساس ویژگی‌های سنگ‌شناسی در مطالعات صحرایی به چهار واحد سنگی به شرح ذیل قابل تقسیم است:

عضو سیمره در سه برش چینه‌شناسی مورد مطالعه با ضخامت‌های بسیار متفاوت ظاهر شده است بطوریکه در برش شیخ مکان ۴۳ متر و در دو برش باعگل و سیاهدره به ترتیب یک و هشت متر ضخامت دارند و از لحاظ

و *Oscillophpha dichotoma* و *Pycnodonte vesiculare* همچنین حاوی قطعات خارپوست، گاستروبود، بروزوا و سایر دوکفهای در رخساره میکروسکوپی است. مرز زیرین این واحد با مارن‌های خاکستری سازند گوری همشیب و تدریجی است (شکل ۲).

#### واحد مارنی لوفادار زیرین (I)

این واحد با ضخامت ۱۷ متر شامل چهار متر تناب مارن‌های خاکستری ضخیم‌لایه حاوی ندول‌های آهکی فراوان با ساختار ژئود داخلی و ۱۳ متر تناب مارن‌های خاکستری و آبی حاوی افق‌های پرسیل دوکفهای واضح شامل



شکل ۲. نمایی از سازند گوری، عضو سیمره و سازندهای زیرین و بالای آن (a)، نمایی نزدیک از واحدهای سنگی عضو سیمره (b)

#### واحد مارنی لوفادار بالایی (III)

این واحد سنگی که روی واحد سنگی شماره ۲ (II) قرار گرفته، از نه متر مارن خاکستری رنگ تشکیل شده است و دارای فسیل‌های دوکفهای لوفا، پیکنودونت و خارپوست به صورت پراکنده به ویژه در قسمت ابتدایی ضخامت خود می‌باشد. همچنین شواهد اکسید آهن به صورت ندول‌های کوچک در این واحد مارنی قابل مشاهده است (شکل ۳-۴a-b).

#### واحد سنگ‌آهک لوفادار بالایی (IV)

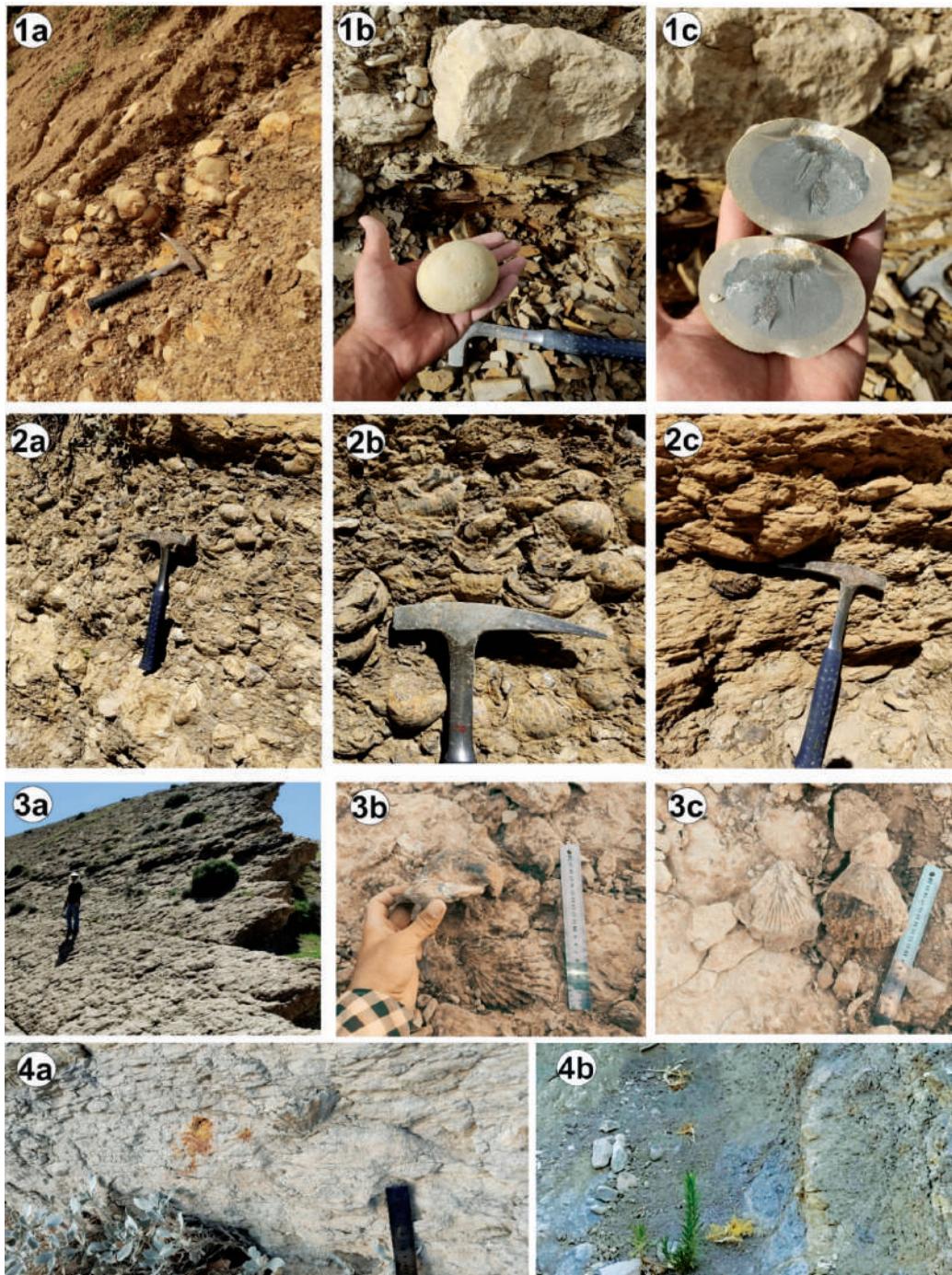
این واحد سنگی که روی واحد سنگی شماره ۳ (III) قرار گرفته، از ۱۴ متر سنگ‌آهک‌های خاکستری تا قهوه‌ای

#### واحد سنگ آهکی لوفادار زیرین (II)

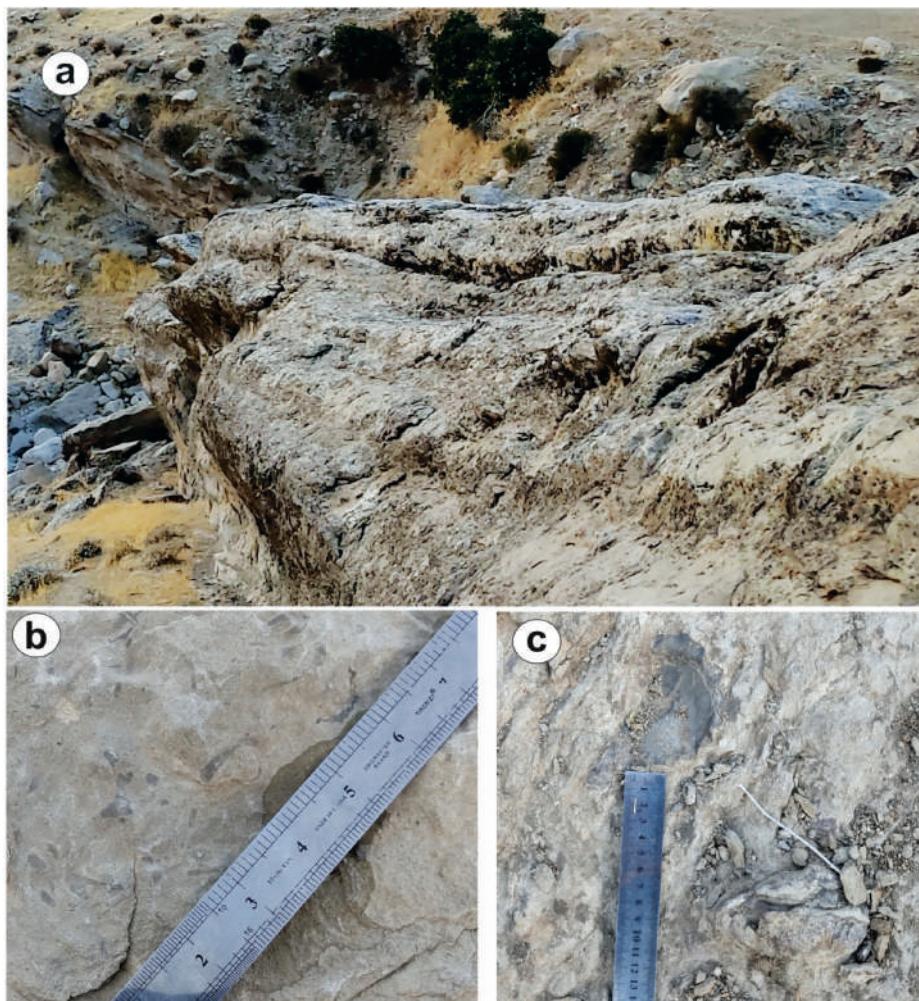
این واحد سنگی روی واحد سنگی شماره ۱ قرار گرفته و از حدود سه متر سنگ‌آهک قهوه‌ای رنگ ضخیم‌لایه و بر جسته تشکیل شده که اولین بخش ستیغ ساز عضو سیمره را از قاعده به سمت بالا تشکیل می‌دهد. این واحد دارای فسیل‌های فراوان از دوکفهای های *Pycnodonte* و به تعداد کمتر دوکفهای های *Oscillophpha vesiculare* و *dichotoma* می‌باشد (شکل ۳-۳a-c). این واحد سنگی، فسیل خارپوست فراوان‌تری نسبت به سایر واحدهای سنگی عضو سیمره دارد.

این سنگ‌آهک‌ها در رخساره میکروسکوپی علاوه بر خرده‌های فسیلی فراوان، دارای فرامینیفرهای بزرگ (LBF) *Lepidorbitoides*, *Orbitoides*, از قبیل جنس‌های *Monolepidorbitoides*, *Rotalia*, *Sirtina* در کنار قطعات پوسته لوفا، بریوزوئر و خارپوست می‌باشد.

رنگ ضخیم‌لایه تشکیل شده است (شکل a-۴). این واحد که آخرین واحد سنگی عضو سیمره است و طبقات آهکی روی آن متعلق به عضو امام حسن می‌باشد حاوی فسیلهای دوکفه‌ای لوفا، پیکنودونت و خارپوست با فراوانی کمتری نسبت به واحد آهکی شماره ۲ (II) می‌باشد (شکل b-c).



شکل ۳. نمایی از واحدهای سنگی عضو سیمره در برش شیخ‌مکان: مارن حاوی سنگ‌آهک‌های ندولار (۱a-c) و دوکفه‌ای‌های لوفا و پیکنودونت (۲a-c) متعلق به واحد سنگی شماره ۱، نمایی از سنگ‌آهک حاوی دوکفه‌ای لوفا (۳a-c) متعلق به واحد سنگی شماره ۲، مارن حاوی دوکفه‌ای لوفا (۴a,b) متعلق به واحد سنگی شماره ۳



شکل ۴. نمایی کلی از واحد سنگی شماره ۴ عضو سیمره (a) و فرامینیفرهای بنتیک بزرگ (b) و دوکفهای های درون آن (c) در برش شیخ‌مکان

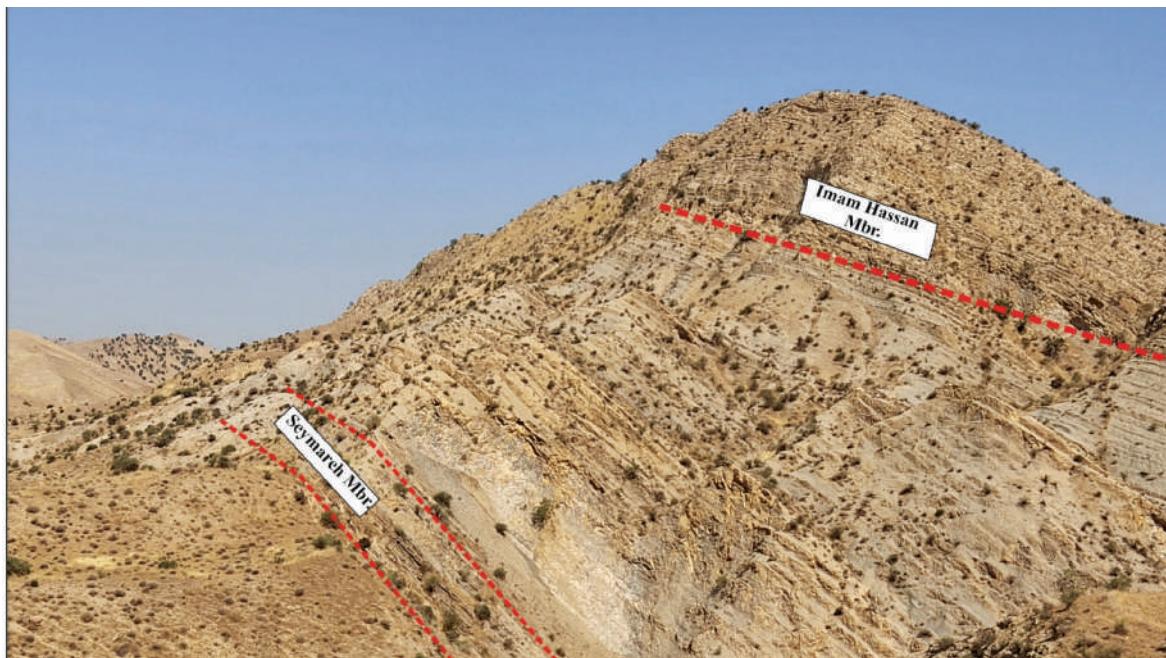
#### ب- عضو سیمره در برش باعَّل (تاقدیس سلطان)

بریوزوا و فرامینیفرهای بنتیک کوچک به همراه دیگر اجزای زیستی دیده می‌شود.

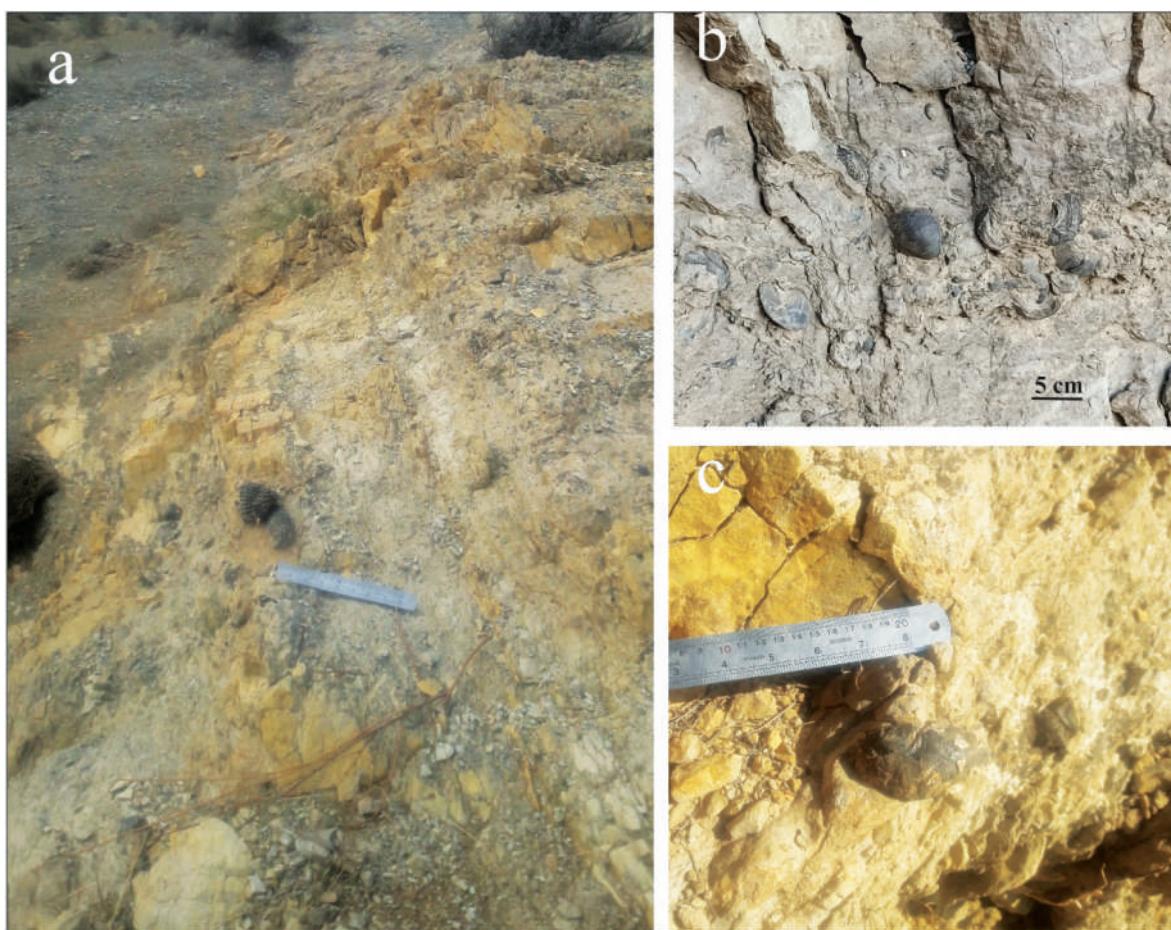
مرز زیرین این عضو با مارن‌های خاکستری‌رنگ سازند گوری تدریجی و مرز بالای آن نیز با شیل‌های آبی تا تیره‌رنگ سازند گوری تدریجی می‌باشد.

ج- عضو سیمره در برش سیاه‌دره (تاقدیس زنگول)  
رخنمون عضو سیمره تاکنون در مطالعات قبلی سازند گوری در تاقدیس زنگول و تاقدیس شمالی‌تر یعنی تاقدیس خرم آباد (مغفوری‌قدم و همکاران، ۱۳۹۶ و مغفوری‌قدم، ۱۳۹۴) که نزدیک زون برخوردي حوضه زاگرس هستند، گزارش نشده است، ولی در برش چینه‌شناسی سیاه‌دره

عضو سیمره در این برش که در بخش مرکزی تاقدیس سلطان قرار دارد برای اولین بار گزارش می‌شود زیرا این واحد در مطالعات قبلی سازند گوری در تاقدیس سلطان که بیشتر معطوف به ناحیه غربی تاقدیس بوده است تاکنون گزارش نشده است. عضو سیمره در برش مذکور هشت متر ضخامت دارد و از لحاظ سنگ‌شناسی از یک واحد متشكل از تناوبی از سنگ‌آهک آهک مارنی سست و مقاوم متوسط تا ضخیم‌لایه بهرنگ کرم تا قهوه‌ای روشن تشکیل شده است (شکل ۵) و حاوی افق‌های پرسیلی از دوکفهای Oscilllopha dichotoma و Pycnodonte vesiculare می‌باشد (شکل ۶-a-۶). همچنین در رخساره میکروسکوپی سنگ‌های این واحد، قطعاتی از خارپوست‌ها، دوکفهای،



شکل ۵. نمایی کلی از سازندگوری و بخش‌های مختلف آن به‌ویژه عضو سیمره در برش چینه‌شناسی باعگل، تاقدیس سلطان



شکل ۶. نمایی نزدیک از واحد سنگ‌آهک‌های مارنی لوفادار (a) و افق‌حاوی دوکفه‌ای فراوان (b,c) مربوط به عضو سیمره در برش چینه‌شناسی باعگل

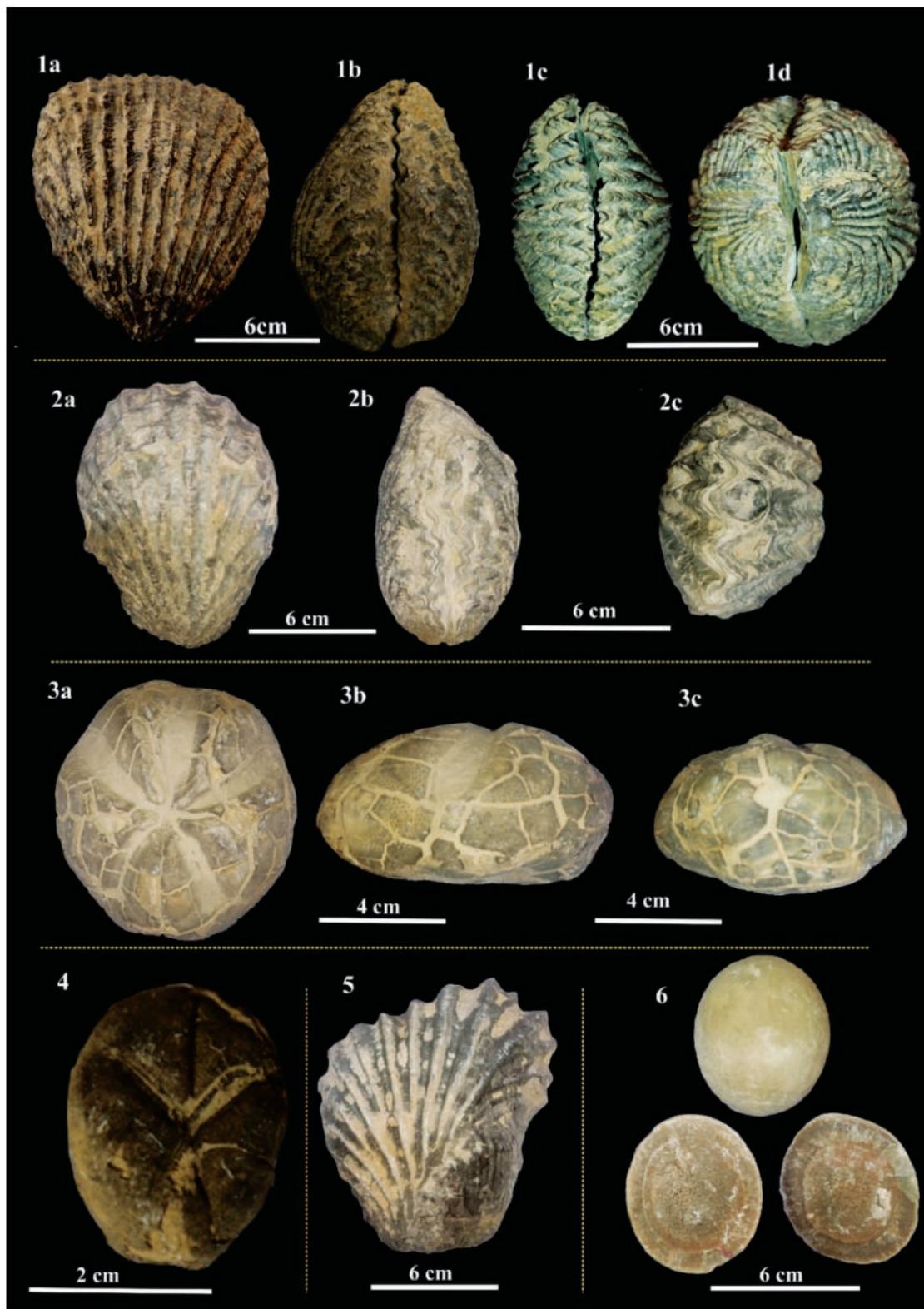
قطعات شکسته دو کفه‌ای‌ها و نمونه‌های کامل دوکفه‌ای (*Pycnodonte vesiculare*) (تاقدیس زنگول) ضخامت آن به کمتر از یک متر می‌رسد و متشکل از مارن‌آهکی است که حاوی عناصر زیستی از قبیل



شکل ۷. نمایی نزدیک از مارن‌آهکی لوفادار عضو سیمره و افق غنی از دوکفه‌ای در برش چینه‌شناسی سیاهدره (تاقدیس زنگول)

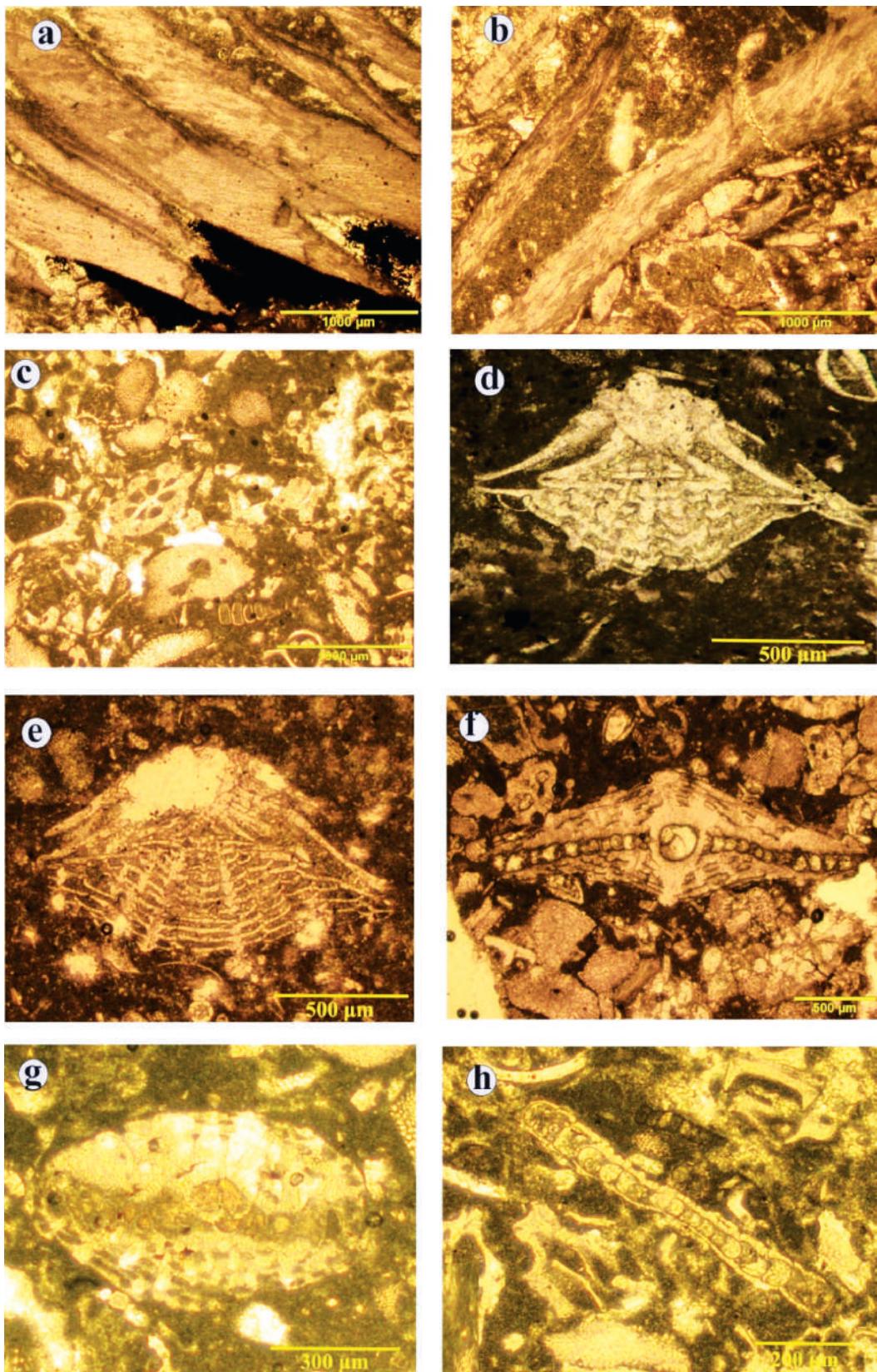
موجود در رسوبات عضو سیمره در برش‌های مورد مطالعه ارائه شده است.

در شکل ۸ تصاویر ماکروسکوپی از دوکفه‌ای، خارپوست و برشی از آهک ندولار و در شکل ۹ تصاویر میکروسکوپی



شکل ۸. تصاویر برخی از ماقروفسیل‌ها (متعلق به واحد سنگی شماره ۲) و یک برش از آهک ندولار (متعلق به واحد سنگی شماره ۱) در رسویات عضو سیمره در برش چینه‌شناسی شیخ مکان

1a-d and 2a-c: *Oscillopha dichotoma* (b. Lateral view, c. Ventral view, d. Dorsal view), Unit 2. 3a-c: *Mecaster kanepanensis* (a. Apical view, b. Lateral view, c. Posterior view), Unit 2. 4: *Hemiaster noemiae*. 5: *Oscillopha dichotoma*, Unit 2. 6: nodular limestone, Unit 1



شکل ۹. تصاویر برشی از عناصر زیستی در مقاطع نازک متعلق به سنگ‌آهک سیمره در برش شیخ مکان

a,b: *Lopha shells*, Unit 2. c: echinoids, benthic foraminifera and bryozoans, Unit 2. d,e: *Sirtina orbitoidiformis*, Unit 4. f,g: *Orbitoides* sp., Unit 4. h: *Monolepidorbis* sp., Unit 4.

## بحث

### تغییرات عضو سیمره از جنوب غرب به شمال شرق لرستان

شمال شرق ناحیه لرستان (نژدیک به زون برخوردی زاگرس) ادامه پیدا کرده به طوری که در تاقدیس زنگول فقط ضخامت کمی (کمتر از یک متر) از واحد سنگی شماره ۱ رخمنون دارد و در تاقدیس خرمآباد (مففوری مقدم، ۱۳۹۴) که آخرین تاقدیس دارای رخمنون سازند گوری بی در شمال پنهانه لرستان است اثری از عضو سیمره دیده نمی‌شود.

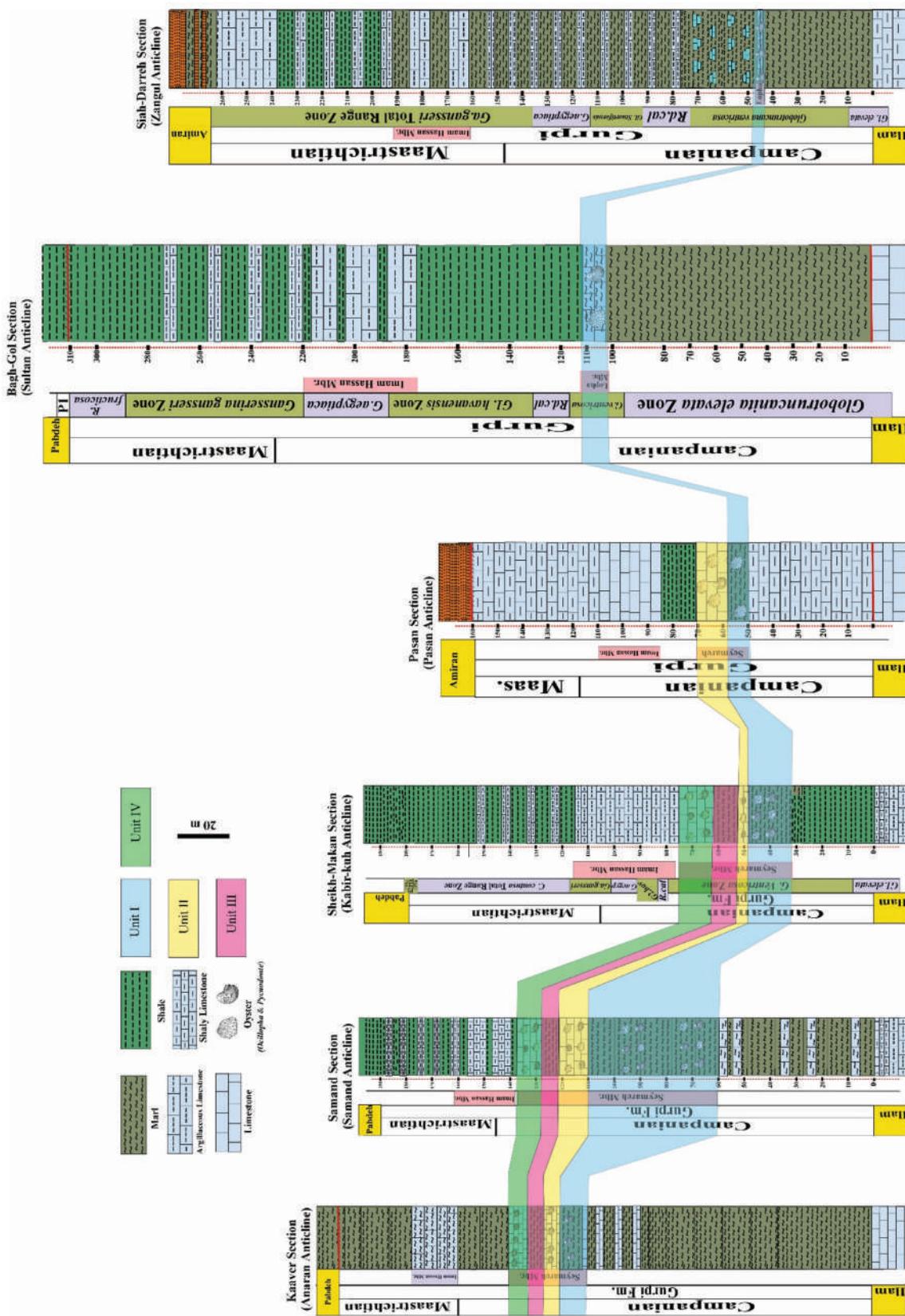
از لحاظ جایگاه سنی، عضو سیمره در برش‌های ناحیه جنوب غربی لرستان (برش‌های کاور و سمند) اغلب سن کامپانین پسین را دارد. سن این عضو در برش‌های شیخ‌مکان و باع‌گل (بازوند و همکاران، ۱۴۰۳؛ بازوند و همکاران ۱۴۰۴) و همچنانی برش سیاهدره با توجه به قرارگیری در بخش میانی بیوزون *Globotruncana ventricosa* کامپانین میانی است (شکل ۱۰).

برای نشان دادن تغییرات ضخامت عضو سیمره و گسترش آن در ناحیه لرستان، از مدل شماتیک حوضه فورلنند زاگرس (DeCells and Giles 1996) با افزودن تغییراتی در این پژوهش استفاده شده است (شکل ۱۱). این مدل نشان‌دهنده چگونگی تغییرات عضو سیمره در حوضه زاگرس و تحت تاثیر بالاً‌آمدگی‌های حوضه و تغییرات عمقی آن است.

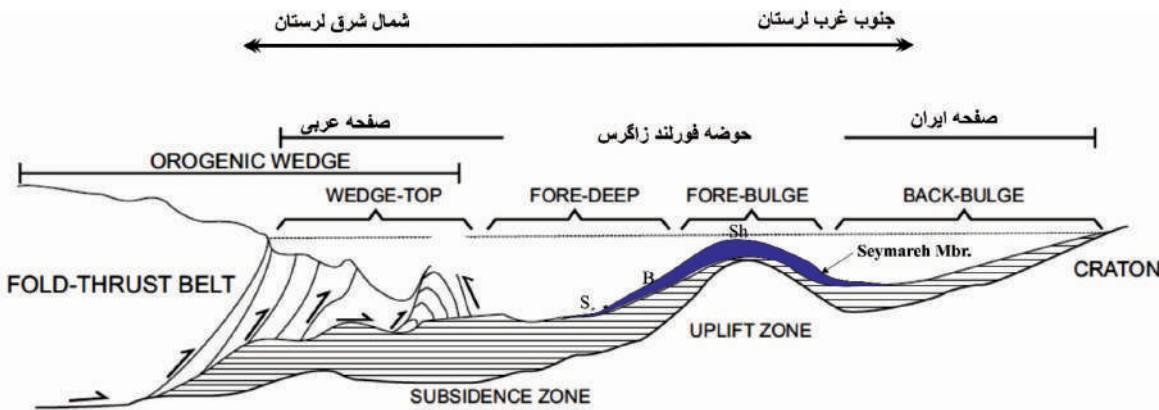
این مدل به خوبی نشان می‌دهد که چگونه هم‌گرایی دو شبه قاره عربستان و ایران مرکزی منجر به تشکیل پیشانی برآمدگی در مرکز حوضه فورلنند زاگرس شده است و با فاصله از این برآمدگی عمق و شبیح حوضه بهویژه در نواحی شمال شرقی نژدیک به منطقه زون برخوردی بیشتر می‌شود. از بین سه برش اصلی مورد مطالعه، عضو سیمره در برش شیخ‌مکان واقع در جنوب غرب ناحیه مورد مطالعه بیشترین ضخامت (۴۳ متر) شامل چهار لیتوزون و در برش سیاهدره واقع در تاقدیس زنگول و شمال شرق ناحیه مورد مطالعه کمترین ضخامت را دارد. ضخامت بیشتر این عضو در جنوب غرب و برش شیخ‌مکان به دلیل قرارگیری محیط رسوبی آن در منطقه‌ای نژدیک رأس برآمدگی (محیط کم‌عمق) و کمترین ضخامت در برش سیاهدره نسبت به نواحی جنوب غربی لرستان را می‌توان به فاصله بیشتر این برش از پیشانی برآمدگی (محیط عمیق‌تر) حوضه فورلنند زاگرس نسبت داد.

برای بررسی گسترش عضو سیمره در یک روند جنوب‌غربی-شمال‌شرقی در زیرزون لرستان، برش‌های مورد مطالعه در این پژوهش با چند برش دیگر (شکل ۱۰) که در این روند قرار گرفته‌اند مورد مقایسه قرار گرفته است. در جنوب‌غربی ترین بخش روند مورد مطالعه، برش کاور در تاقدیس انصاران قرار دارد که ضخامت عضو سیمره در آن توسط همتی‌نسب (۱۳۸۷) حدود ۳۰ متر اندازه‌گیری شده است و عضو سیمره را به دو بخش بالایی و پایینی جدا کرده است. با توجه به بازدید میدانی در این پژوهش از تاقدیس انصاران و نژدیک به برش کاور، چهار واحد سنگی (I, II, III, IV) شرح داده شده در این مقاله در بیشتر نقاط آن با ضخامتی حدود ۳۰ متر قابل تفکیک است و برای یکپارچه شدن توصیف واحدهای سنگی در این پژوهش، عضو سیمره در برش کاور نیز به چهار واحد سنگی جدا شده است.

پس از برش کاور به سمت شمال شرق آن برش سمند قرار گرفته است که عضو سیمره در آن نیز همانند اغلب برش‌های گستره جنوب غربی، از چهار واحد سنگی معادل واحدهای مذکور تشکیل شده و با ضخامت حدود ۸۰ متر بیشترین ضخامت را در بین برش‌های ذکر شده در این مقاله دارا است. در ادامه، برش شیخ‌مکان با ضخامت ۴۳ متر شامل چهار واحد سنگی مذکور قرار گرفته است که هر کدام از این واحدهای مشخص، ویژگی‌های کم‌وبیش یکسانی با واحدهای هم‌ارز خود در برش‌های مختلف این ناحیه دارد به طوری که واحد شماره ۱ (I) در تاقدیس کبیرکوه کم‌وبیش همان رخساره و محتویات زیستی را دارد که در واحد شماره ۱ تاقدیس سمند و انصاران مشاهده می‌شود. به سمت مرکز ناحیه لرستان و سپس شمال و شمال شرقی آن، به دلیل بیشتر بودن عمق حوضه رسوبی تنها واحدهای شماره ۱ و ۲ شرایط نهشت‌شدن داشته‌اند، به طوری که در برش پاسان عضو سیمره با ضخامت ۲۰ متر شامل واحدهای شماره ۱ و ۲ و در برش باع‌گل با ضخامت هشت متر فقط شامل واحد شماره ۱ است. کاهش ضخامت عضو سیمره به سمت



شكل ۱۰. مقایسه عضو سیمره در برخشهای مورد مطالعه با چند برش هم‌جوار در یک روند جنوب غربی-شمال شرقی



شکل ۱۱. مدل حوضه فورلند زاگرس و تغییرات ضخامت و محدوده گسترش عضو سیمره در برش‌های شیخ‌مکان (Sh)، باغ‌گل (B) و سیاهدره (S) برگرفته از DeCells and Giles, 1996

## منابع

- بازوند، ا.، صادقی، ع.، آدابی، م. ح.، جمالی، ا. م. و هداوند خانی، ن.، ۱۴۰۴. زیست‌چینه‌نگاری سازندگوری بر مبنای روزن‌بران پلانکتونی در برش شیخ‌مکان (تاقدیس کبیرکوه، ناحیه لرستان)، فصلنامه علمی علوم زمین‌زمین، ۳۵(۱)، ۱-۱۸. doi: 10.22071/gsj.2024.457598.2141
- بازوند، ا.، صادقی، ع.، آدابی، م. ح.، جمالی، ا. م. و هداوند خانی، ن.، ۱۴۰۳. زیست‌چینه‌نگاری و بررسی تغییرات عمق دیرینه نهشته‌های سازندگوری بر مبنای فرامینیفرهای پلانکتونی در برش باغ‌گل، ناحیه لرستان، حوضه زاگرس، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۷۰(۱۸)، ۹۶-۷۹.
- بلمکی، ب.، اصغریان‌رستمی، م. و حیدری‌نیا، م. و محمدی، م.، ۱۳۸۹. مطالعه جغرافیای دیرینه عضو سیمره، سازندگوری، بر مبنای مطالعه سیستماتیک خارپوستن و روزن‌داران در برش میش-خاص، جنوب شرق استان ایلام، نشریه رخساره‌های رسوی، ۲(۲)، ۳۰-۱۹.
- قورچایی، ش.، ۱۳۸۵. بیواستراتیگرافی سازندگوری در شمال کبیرکوه بر مبنای فرامینیفر؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۶۷.
- مغفوری مقدم، ا.، ۱۳۹۴. ریز زیست‌چینه‌نگاری سازندگوری در ریال جنوب باختری تاقدیس خرم‌آباد، حوضه زاگرس، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، (۱۸)، ۳۸-۳۲.
- همتی‌نسب، م.، ۱۳۸۷. میکروبایوستراتیگرافی و چینه‌نگاری سکانسی سازندگوری در برش کاور، جنوب کبیرکوه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۷۵.

## نتیجه‌گیری

عضو سیمره در برش شیخ‌مکان با ضخامت ۴۳ متر شامل چهار واحد سنگی با لیتوولوژی مارن و سنگ‌آهک، در برش باغ‌گل با ضخامت هشت متر شامل یک واحد سنگی با لیتوولوژی آهک مارنی و در برش سیاهدره با ضخامت کمتر از یکی متر شامل لیتوولوژی مارن آهکی است که این واحدهای سنگی حاوی ماکروفسیل دوکفه‌ای، خارپوست و سایر عناصر زیستی مربوط به این رخساره کم عمق می‌باشند. سن عضو سیمره براساس زون‌های زیستی فرامینیفری پایین و بالای آن، در برش‌های شیخ‌مکان، باغ‌گل و سیاهدره کامپانی می‌باشد. مقایسه این عضو در برش‌های مورد مطالعه با سایر برش‌های هم‌رونده (جنوب غربی-شمال شرقی) از لحاظ گسترش جغرافیایی نشان‌دهنده کاهش تدریجی ضخامت این عضو به دلیل تغییرات عمق ناشی از حرکات تکتونیکی حوضه فورلند زاگرس در انتهای دوره کرتاسه از جنوب غرب به سمت شمال شرق لرستان می‌باشد به طوری که از جنوب غرب به سمت شمال شرق لرستان از چهار واحد سنگی به یک واحد می‌رسد و در نزدیکی زون برخوردي (شمال و شمال شرق لرستان) به دلیل عمیق شدن محیط رسوب‌گذاری به طور کلی بدون رخنمون است.

- Bolli, H.M., Saunders, J.B. and Perch-Nielsen, K. eds., 1989. Plankton stratigraphy: volume 1, planktic foraminifera, calcareous nanofossils and calpionellids (Vol. 1). CUP Archive.
- Darabi, G., Maghfouri-Moghaddam, I., Sadeghi, A. and Yusefi, B., 2018. Planktonic foraminifera and sea-level changes in the upper Cretaceous of the Gurpi Formation, Lorestan basin, SW Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 138, 201-218. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2017.11.011
- DeCelles, P.G. and Giles, K.A., 1996. Foreland basin systems. *Basin research*, 8(2), 105-123.
- Hashmie, A., Rashwan, M., El Hedeny, M., Sharyari, S., Rahimi, S. and Mansour, H., 2020. Facies development, palaeoecology, and palaeoenvironment of the Seymareh (Lopha Limestone) Member of the Gurpi Formation (Upper Campanian), Lurestan Province, SW Iran. *Geological Journal*, 55(10), 1-14.
- Heydari E., 2008. Tectonics versus eustatic control on supersequences of the Zagros Mountains of Iran. *Tectonophysics*, 451(1-4), 56-70. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.046>
- Homke, S., Verges, J., Serra-Kiel, J., Bernaola, G., Sharp, I., Garcés, M., Montero-Verdú, I., Karpuz, R. and Goodarzi, M-H., 2009. Late Cretaceous-Paleocene formation of the proto-Zagros foreland basin, Lurestan Province, SW Iran. *GSA Bulletin*, 121(7/8), 963-978. doi:10.1130/B26035.1
- James, G. A. and Wynd, J. G., 1965. stratigraphy nomenclature of the Iranian, oil consortium agreement area, Report No.1027.
- Kamyabi Shadan, H., Dashtban, H., Roshandel Arbatani, B. and Foroghi, F., 2019. Late Cretaceous Echinoids from the Seymareh member (Lopha Limestone member), KabirKuh Anticline, Southwest of Iran. *Geopersia*, 9(2), 305-350.
- Kroh, A. and Smith, A.B., 2010. Classification and phylogeny of post-Palaeozoic echinoids. *Journal of Systematic Palaeontology*, 7, 147-212.
- Loeblich, A. R. and Tappan, H., 1988. Foraminifera Genera and their Classification, Van Nostrand Reinhold, New York, 970.
- Smith, A.B. and Wright, C.W., 2003. British Cretaceous echinoids. Part 7, Atelostomata, 1. Holasteroida: 440- 568, 139. 182, The Palaeontographical Society Monographs, London.
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG bull.* 52(7), 1229-1258.
- Stocklin, J. and Setudehnia, A., 1991. Stratigraphic Lexicon of Iran; Geological Survey of Iran, Tehran, 18, 409.
- Olsson, R. K., Berggren, W. A., Hemleben, C. and Huber, B. T. 1999. Atlas of Paleocene planktonic foraminifera, Smithsonian institutionpress, Washington, 252.
- Postuma, J. A., 1971. Manual of planktonic foraminifera, Amsterdam, London, Elsevier.
- Premoli Silva, I. and Verga, D., 2004. Practical Manual of Cretaceous Planktonic Foraminifera, Course 3. In: Verga, D., Rettori, R. (Eds.), International school of Planktonic Foraminifera. Universities of Perugia and Milano. Tripografiadi di Pontefecino, Perugia, 283.
- Razmjooei, M.J., Shahryari, S., Kani, A., Ullmann, C.V., Jamali, A.M., Rahimi, S., Verges, J. and Thibault, N., 2021. Integrated bio-and carbon isotope stratigraphy of the Campanian-Danian sedimentary succession in Lurestan (Zagros Basin, Iran): Implications for syntectonic facies distribution and basin evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 214, 104779.
- Saura, E., Vergés, J., Homke, S., Blanc, E., Serra-Kiel, J., Bernaola, G., Casciello, E., Fernández, N., Casini, G., Embry, J.C. and Sharp, I.R., 2011. Basin architecture and growth folding of the NW Zagros early foreland basin during the Late Cretaceous and early Tertiary. *Journal of the Geological Society*, 168(1), 235-250. doi: 10.1144/0016-76492010-092.
- Van Buchem, F.V., Gaumet, F., Viedrenne, V. and Vincent, B., 2006. Middel East Cretaceous sequence stratigraphy study. Part 1-S.W.Iran. Final report, Institut Français du pétrol in cooperation with the National Iranian Oil Company-Exploration Directorate.

# مقایسه عملکرد باکتری *Methylocrumb sp.* در حذف ترکیبات نفت خام به صورت آزاد و تثبیت شده: رویکردی بر پایه فعالیت آنزیم‌های کلیدی

میترا پارسا<sup>۱</sup> و سنبل ناظری<sup>(۲)\*</sup>

- دانشجوی دکتری، گروه تولیدات و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
- دانشیار، گروه تولیدات و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

## چکیده

نشست نفت خام و ماندگاری ترکیبات هیدروکربنی در محیط‌زیست، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌ها محسوب می‌شود. این ترکیبات به دلیل سمیت، پایداری بالا و تجمع در منابع آب و خاک، موجب اختلال در زنجیره‌های غذایی و تشدید بحران‌های زیست‌محیطی می‌شوند. زیست‌پالایی با بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌ها، راهکاری مؤثر، اقتصادی و سازگار با محیط برای حذف این آلاینده‌ها است. در این پژوهش، توان تجزیه نفت خام توسط باکتری *Methylocrumb sp.* در دو وضعیت سلول آزاد و تثبیت شده در آرژینات سدیم بررسی و فعالیت آنزیم‌های آلкан‌مونواکسیژناز، سیتوکروم P450 و لیپاز به عنوان آنزیم‌های کلیدی در تجزیه ترکیبات نفتی ارزیابی شد.

نتایج نشان داد که در حضور چهار درصد نفت خام (۳۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، باکتری در حالت آزاد موفق به تجزیه حدود ۵۵٪ درصد از ترکیبات نفتی شد، درحالی‌که تثبیت آن در دانه‌های آژیناتی موجب افزایش تجزیه به ۷۰٪ درصد شد. آنالیز GC-MS نشان داد آلkan‌های سبک (C4-C9) به طور کامل و ترکیبات سنگین (C14-C28) تا ۷۴٪ درصد در حالت تثبیت شده تجزیه شدند. تصاویر میکروسکوپی FE-SEM ساختار متخلخل دانه‌ها و توزیع مناسب سلول‌ها را نشان داد. بیشینه فعالیت آنزیمی آلkan‌مونواکسیژناز، سیتوکروم P450 و لیپاز در سلول‌های تثبیت شده در روز سوم به ترتیب برابر با ۹/۵، ۹/۵۵ و ۱۳/۵۵ واحد بر میلی‌گرم بود. تثبیت باکتری موجب افزایش پایداری، حفاظت سلولی و ارتقای عملکرد تجزیه‌های شد. نتایج این مطالعه نقش اثربخش تثبیت *Methylocrumb sp.* را در زیست‌پالایی نفت خام تأیید کرده و می‌تواند گامی مؤثر در توسعه سامانه‌های مقیاس‌پذیر، ایمن و دوستدار محیط‌زیست برای مدیریت آلودگی‌های نفتی بهشمار رود.

**واژه‌های کلیدی:** آلkan‌مونواکسیژناز، باکتری *Methylocrumb sp.*، تثبیت سلولی، سیتوکروم P450 و لیپاز.

## مقدمه

بنزن و تولوئن را با راندمان قابل توجهی تجزیه نماید. این یافته‌ها حاکی از توان بالای این باکتری در تحمل شرایط آلوده، مصرف متabolیت‌های واسطه‌ای حاصل از تجزیه ناقص و ایقای نقش مؤثر در کاهش بار آلاینده‌ها در محیط است (Maki et al., 2023).

یکی از مهم‌ترین دلایلی که باکتری‌های تجزیه‌کننده قادر به تجزیه ترکیبات نفتی هستند، حضور آنزیم‌های زیست‌جزیه‌ای اختصاصی در ساختار آن‌هاست که امکان شکستن پیوندهای شیمیایی هیدروکربن‌ها را فراهم می‌سازد (Wasoh et al., 2019; Yong and Zhong, 2010). کارایی تجزیه هیدروکربن‌ها به طور عمدۀ به گونه‌های باکتریایی درگیر و ماهیّت مکانیزم‌های اکسیداسیون آنزیمی آن‌ها بستگی دارد (Parthipan et al., 2017). آنزیم‌های دخیل در تجزیه زیستی آلkan‌ها بر اساس طول زنجیره کربنی ترکیبات هدف، به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند (Van Beilen and Funhoff, 2007).

آلkan‌های با زنجیره کوتاه (C1-C4) بیشتر توسط آنزیم متان‌مونواکسیژناز تجزیه می‌شوند که با وارد کردن یک اتم اکسیژن به مولکول، آن را برای مراحل بعدی متabolیسم آماده می‌کند. آلkan‌های با زنجیره متوسط (C5-C16) توسط آنزیم‌های آلkan‌مونواکسیژناز بدون هم مورد اکسیداسیون قرار می‌گیرند که توسط ژن‌هایی مانند AlkB کد می‌شوند و آلkan‌ها را مستقیم به الکل‌های اولیه تبدیل می‌کنند (Van Beilen et al., 1994). در مقابل، تجزیه آلkan‌های با زنجیره بلندتر از ۲۰ کربن به عهده آنزیم‌هایی نظیر سیتوکروم P450، آلkan‌هیدروکسیلазهای دی‌آهن و مونواکسیژنازهای واپسّته به فلاووین است که از طریق واکنش‌های اکسیداتیو پیچیده، ترکیبات نفتی سنتگین را به اجزای قابل جذب و متabolیسم توسط باکتری‌ها تبدیل می‌کنند (Parthipan et al., 2017; Singh et al., 2012).

این، آنزیم‌های لیپاز نیز نقش مؤثری در زیست‌جزیه نفت خام دارند (Kadri et al., 2018). این آنزیم‌ها قادرند پیوندهای استری موجود در ترکیبات چرب را شکسته و اسیدهای چرب و گلیسرول آزاد کنند. اسیدهای چرب حاصل می‌توانند

در دنیای امروز، هیدروکربن‌های موجود در نفت خام همچنان یکی از منابع اصلی تأمین انرژی محسوب می‌شوند. با این حال، این ترکیبات به دلیل ویژگی‌های سمی، سلطان‌زا و پایداری بالا در برابر تجزیه زیستی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌ها به شمار می‌آیند. از جمله پیامدهای زیست‌محیطی حضور آن‌ها می‌توان به آلدگی منابع آب و خاک، برهم خوردن تعادل در زنجیره‌های غذایی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای اشاره کرد که در نهایت منجر به بروز چالش‌های اقتصادی و اجتماعی گستردۀ (Ahmed and Fakhruddin, 2018; Elijah, 2022; Mohanta et al., 2024; Tahmasbizadeh et al., 2025) علاوه بر این، حضور نفت خام در محیط، به ویژه در موارد نشت نفت، خطرات بلندمدت زیست‌محیطی ایجاد می‌کند که نیازمند اقدامات نظارتی سخت‌گیرانه و راهکارهای پایدار است (Godec and Biglarbigi, 1991; Ngene et al., 2016; Sojinu and Ejeromedoghene, 2019).

فرایند پاکسازی آلودگی نفتی از طریق روش‌های فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی و زیستی صورت می‌گیرد. روش‌های شیمیایی و فیزیکی به طور معمول نیازمند تجهیزات صنعتی پرهزینه و مصرف انرژی بالا هستند. در مقابل، تجزیه زیستی راهکاری مناسب و دوستدار محیط‌زیست برای حذف ترکیبات نفتی به شمار می‌آید (Omotosho, 2024; Rezaei et al., 2016). اثربخشی این روش تا حد زیادی وابسته به انتخاب گونه‌های میکروبی مناسب و همچنین شرایط محیطی حاکم بر فرایند پالایش است. گونه‌های مختلفی مانند *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas* و *Flavobacterium* مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Salam et al., 2015). یکی دیگر از میکروارگانیسم‌ها، باکتری‌های متیلوتروف اختیاری مانند *Methylorubrum* هستند که می‌توانند ترکیبات تک کربنی مانند متانول و فرمالدهید را متabolیزه کرده و در شرایط محیطی متنوع به فعالیت پردازند. علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که باکتری *Methylorubrum extorquens* قادر است ترکیبات آromاتیک نفتی نظیر نفتالن، زایلن،

سیتوکروم P450 و لیپاز، بررسی شد. شایان توجه است که این پژوهش، نخستین مطالعه‌ای است که عملکرد باکتری *Methylorubrum sp.* را در حالت تثبیت‌شده، به طور مستقیم و اختصاصی در زمینه تجزیه ترکیبات نفتی مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

## روش مطالعه

بهینه کردن شرایط رشد و تعیین نرخ رشد باکتری در این مطالعه از گونه باکتریایی *Methylorubrum sp.*

که توسط گروه بیوتکنولوژی دانشگاه بوعالی سینا شناسایی شده بود، استفاده شد. برای آماده‌سازی تلقیح، باکتری مورد نظر در ۱۰۰ میلی‌لیتر محیط کشت LB کشت داده شد و در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت شیکر ۱۳۰ دور در دقیقه به مدت ۷۲ ساعت گرم‌گذاری شد. پس از گذشت ۷۲ ساعت، سلول‌ها با استفاده از سانتریفیوژ با سرعت ۸۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد جداسازی شدند. سپس سلول‌ها دو بار با محلول درصد کلرید سدیم شست و شو داده شده و در همان محلول نگهداری شدند. در نهایت، چگالی نوری (OD) نمونه در طول موج ۶۰۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفوتومتر بر مقدار یک تنظیم شد که این مقدار معادل با غلظت  $10^8$  CFU/mL بود (Sakdapetsiri et al., 2021).

برای تعیین pH بهینه برای رشد باکتری، باکتری *Methylorubrum sp.* بر روی محیط MSM حاوی چهار درصد (۳۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) نفت خام ایرانی در بازه‌های پنج تا هشت (۵، ۶، ۵/۵، ۷، ۶/۵ و ۸) به مدت ۵ روز در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد انکوبه شدند. نرخ رشد باکتری در فواصل زمانی مختلف (صفر، ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۳۰، ۳۶، ۴۸، ۶۰، ۷۲، ۸۴، ۹۶، ۱۰۸ و ۱۲۰ ساعت) از طریق شمارش واحدهای تشکیل‌دهنده کلونی (CFU) روی محیط کشت Jett et al., (1997) اندازه‌گیری شد. پس از تعیین pH بهینه، میانگین زمان تولید (Td) و نرخ رشد ویژه ( $\mu$ ) باکتری با استفاده از روش زویترینگ و همکاران (Zwietering et al., 1990) محاسبه شد.

به عنوان منبع انرژی و کربن برای رشد میکروارگانیسم‌ها عمل کرده و موجب تسريع فرآیند تجزیه ترکیبات نفتی شوند. از آن‌جا که تجزیه نفت خام یک فرآیند مداوم و چند مرحله‌ای است، ترکیبات واسطه‌ای حاصل از تخریب آلکان‌های خطی می‌توانند به عنوان ترکیبات حدواسط برای فعالیت لیپازها و استرازها عمل کنند. این تعامل آنزیمی میان مسیرهای متابولیکی مختلف، باعث بهبود کارایی زیست‌پالایی شده و امکان رهگیری دقیق‌تر پیشرفت تجزیه زیستی را فراهم می‌سازد (Adlan et al., 2020).

اگرچه زیست‌پالایی به عنوان روشی مؤثر، کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست برای حذف آلاینده‌های نفتی شناخته می‌شود، اما در عمل با چالش‌هایی نظیر کاهش فعالیت میکروبی، از دست رفتن سویه‌های مؤثر و نایابی‌داری عملکرد مواجه است. در این میان، استفاده از فناوری تثبیت میکروبی با فراهم آوردن شرایطی پایدارتر برای رشد و فعالیت سلول‌ها، حفظ تراکم بالا، کاهش تلفات میکروارگانیسم‌ها و افزایش مقاومت آن‌ها در برابر تنش‌های محیطی، می‌تواند راهکاری مؤثر برای غلبه بر این محدودیت‌ها باشد (Laothamteep et al., 2022). این روش، کارایی افزایش زیستی را به طور قابل توجهی بالا می‌برد و امکان کنترل بهتر بر تعاملات میکروبی در سایتهاي آلووده را فراهم می‌آورد. مزایای مختلفی از سیستم‌های سلول تثبیت‌شده نسبت به سلول‌های آزاد ارائه شده است که می‌توان به مقاومت بیشتر در برابر شرایط محیطی سخت، نیاز کمتر به محیط رشد و فضا و سهولت جداسازی سلول از محیط کشت اشاره کرد (Eroglu et al., 2015; Moreno-García et al., 2018; Partovinia and Rasekh, 2018; Srividya and Vishnuvarthan, 2014).

در این مطالعه، کارایی حذف نفت خام توسط باکتری *Methylorubrum sp.* در دو وضعیت سلولی آزاد و تثبیت‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت تا مشخص شود آیا فرایند تثبیت‌شده می‌تواند موجب زیست‌تجزیه ترکیبات نفتی گردد یا خیر. همچنین، میزان فعالیت آنزیم‌های کلیدی دخیل در تجزیه هیدروکربن‌ها، از جمله آلکان‌مونو‌اکسیژناز،

دور در دقیقه به مدت ۱۵ روز گرمگذاری شدند. برای بررسی اثرات غیرزیستی، یک نمونه شاهد شامل دانه‌های استریل (فاقد باکتری) در محیط کشت MSM حاوی چهار درصد نفت خام تهیه شد تا میزان اتلاف نفت به دلایل فیزیکی یا جذب سطحی مورد بررسی قرار گیرد. تمامی آزمایش‌ها به صورت سه تکرار مستقل انجام شد.

**اندازه‌گیری هیدروکربن‌های نفتی کل (TPH)**  
در روز پانزدهم، همه نمونه‌ها با ۲۰ میلی‌لیتر مخلوط ان هگزان: دی‌کلرومتان (نسبت ۱:۱) برای استخراج نفت باقیمانده ترکیب شدند. سپس از روش وزنی مطابق با Khanpour علی کلایه و همکاران (Khanpour-Alikelayeh et al., 2020) برای تعیین مقدار نفت باقیمانده استفاده شد.

#### آنالیز GC-MS

نفت خام باقیمانده پس از هفت روز انکوباسیون، با استفاده از دو مرحله استخراج با دی‌کلرومتان استخراج شد (Baltaci et al., 2024). آنالیز نمونه‌ها با دستگاه Agilent GC 6890/MS 5973 و ستون HP-5MS انجام گرفت. به منظور تزریق، حجم یک میکرولیتر از نمونه با نسبت تقسیم ۱:۱۰ وارد دستگاه شد. گاز حامل هلیوم با دبی ۱ میلی‌لیتر در دقیقه، دمای تزریق ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد، و برنامه دمایی از ۴۰ تا ۲۸۰ درجه با نرخ افزایش ۱۰ درجه در دقیقه تنظیم شده بود. طیف جرمی در بازه جرم-بار ۳۰ تا m/z ۴۰۰ با سرعت ۶ طیف در ثانیه ثبت گردید. شناسایی ترکیبات بر اساس مقایسه با کتابخانه طیفی NIST05 انجام شد.

#### سنجرش فعالیت سه آنزیم‌های تخریب‌کننده ترکیبات نفتی

پیش از سنجرش فعالیت آنزیم‌های آلکان مونواکسیژناز (AlkB)، سیتوکروم P450 (CYP450) و لیپاز، سلول‌های تشییت شده در دانه‌های آژینات با استفاده از محلول سیترات سدیم با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر و بر اساس روش لی و همکاران (Lee et al., 1991) آزادسازی شدند.

سپس، فعالیت آنزیم AlkB با سنجرش میزان اکسیداسیون NADH در طول موج ۳۴۰ نانومتر

#### تشییت باکتری در دانه‌های آژینات

برای تشییت باکتری، مایع تلقیح با غلظت حدود  $10^8$  CFU/mL تهیه شد. سلول‌های باکتری با سانتریفیوژ ۴۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه از محیط کشت جدا سازی شدند و سپس در محلول استریل (W/V) دو درصد آژینات سدیم معلق شدند و به آرامی به مدت یک ساعت مخلوط شدند. مخلوط به داخل بورت ۲۵ میلی‌لیتری منتقل شد که در فاصله ۱۴ سانتی‌متری بالای سطح محلول ۰/۲ مولار کلرید کلسیم قرار داشت. قطرات به شکل دانه‌هایی با قطر تقریبی یک میلی‌متر در آمده و به مدت دو ساعت جهت تکمیل فرایند ژل شدن در محلول کلرید کلسیم نگهداری شدند. سپس دانه‌های حاوی سلول‌های باکتری با آب مقطر استریل شسته شده و در دمای اتاق تا زمان استفاده نگهداری شدند.

#### میکروسکوپ الکترونی روبشی با نشر میدانی (FE-SEM)

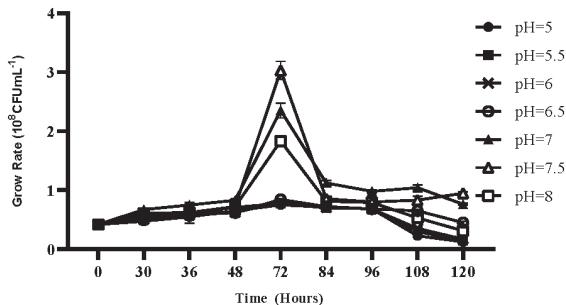
برای بررسی ساختار سطح مقطع دانه‌های آژینات کلسیم حاوی باکتری‌های تشییت شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی با نشر میدانی (FE-SEM) استفاده شد. دانه‌ها به صورت تدریجی در اتانول با غلظت‌های (از ۱۰ تا ۱۰۰ درصد) دهیدراته شدند. سپس به مدت یک ساعت در جریان هوا خشک و با لایه نازکی از طلا پوشش داده شدند و با استفاده از نوار گرافیتی روی پایه میکروسکوپ پیاده‌سازی و ساختار آنها مشاهده و ثبت شد.

#### آزمون‌های تجزیه زیستی نفت خام

##### طراحی آزمایش

دو آزمایش برای ارزیابی توانایی گونه باکتریایی در تجزیه نفت خام انجام شد. در آزمایش اول، از سلول‌های آزاد باکتری استفاده گردید. آزمایش دوم مشابه آزمایش اول بود، با این تفاوت که به جای سلول‌های آزاد، از تعداد مشابهی از سلول‌ها به صورت تشییت شده در دانه‌های آژینات کلسیم استفاده شد. هر دو آزمایش در ۵۰ میلی‌لیتر محیط کشت MSM حاوی چهار درصد نفت خام انجام گرفت. نمونه‌های مورد آزمایش در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و با سرعت ۱۵۰

خنثی تا قلیایی گزارش کرداند، همچنانی دارد (Fatajeva et al., 2014; Qu et al., 2023; Rojas-Gätjens et al., 2022; Zhang et al., 2021). کیم و همکاران (Kim et al., 2005) گزارش کردند که گونه *M. vanbaalenii* PYR-1 در محیط حاوی پایرن و فنانترن، بالاترین نرخ رشد را در بازه pH بین ۶/۵ تا ۷/۵ نشان داده است (Kim et al., 2005).



شکل ۱. نرخ رشد باکتری *Methylochromatium* sp. در سطوح مختلف pH در محیط MSM حاوی چهار درصد (۳۲۰۰ میلی گرم در لیتر) نفت خام

**نرخ رشد باکتری در بازه زمانی مختلف**  
در شرایط کنترل (محیط حاوی یک درصد گلوکز)، رشد *Methylochromatium* sp. به طور پیوسته افزایش یافت و در حدود ۳۰ ساعت (بیش از یک روز) به بیشینه مقدار خود رسید؛ اما پس از آن کاهش قابل توجهی در تراکم سلولی مشاهده شد. در محیط حاوی چهار درصد نفت خام، اگرچه نرخ رشد نسبت به شرایط کنترل کمتر بود، اما بیشینه رشد در حدود ۷۲ ساعت (سه روز) به دست آمد. در این شرایط، نرخ رشد ویژه باکتری برابر با  $1.028 \times 10^{28} \text{ d}^{-1}$  و زمان دو برابر شدن برابر با  $6.74 \text{ روز}$  برآورد شد (شکل ۲).

مطالعات متعددی نرخ رشد ویژه گونه‌های باکتریایی تجزیه‌کننده را گزارش کرداند. به عنوان مثال، سویه *Pseudomonas* sp. LP5 که از خاک آلوده به هیدروکربن در لاغوس نیجریه جداسازی شده بود، در فرآیند تجزیه روغن موتوئ مصرف شده، نرخ رشدی برابر با  $0.13 \times 10^{10} \text{ d}^{-1}$  نشان داد (Obayori et al., 2014). همچنین، سلام و همکاران (Salam et al., 2015) گزارش کردند که سویه *Methylobacterium mesophilicum* در حضور روغن موتوئ مصرف شده داشته است

(Schellenberg and Hellerman, 1958) با آزمون طیف تفاوتی CO در طول موج ۴۵۰ نانومتر (Zuo et al., 2010) و فعالیت لیپاز با استفاده از بستر pNPP و اندازه‌گیری جذب در طول موج ۴۰۵ نانومتر (Jauhari et al., 2014) سنجش شدند.

## آنالیز آماری

تمام آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شدند و داده‌ها به صورت میانگین  $\pm$  انحراف معیار (SD) ارائه شدند. تفاوت بین تیمارها با آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) و آزمون چندگانه توکی بررسی شد. سطح معنی‌داری در  $p < 0.01$  در نظر گرفته شد. نمودارها با نرم‌افزار GraphPad Prism 8 رسم شدند.

## بحث

### تأثیر pH بر رشد باکتری

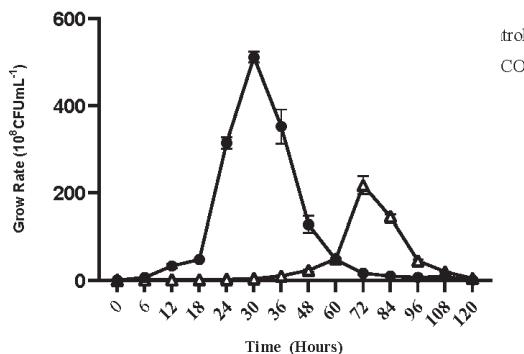
رشد باکتری *Methylochromatium* sp. در بازه pH از پنج تا هشت در محیط MSM حاوی ۳۲۰۰ میلی گرم در لیتر نفت خام به عنوان تنها منبع کربن بررسی شد. بیشترین رشد در pH ۷/۵ مشاهده شد و حدود ۷۲ ساعت پس از شروع کشت (۳ روز)، به بالاترین میزان رشد خود رسید و از آن پس، رشد باکتری روند کاهشی پیدا کرد. این باکتری در pH ۶/۵ و هفت نیز رشد خوبی داشت، اما در pH ۵/۵ پنج و ۵/۵ رشد چندانی نداشت که نشان‌دهنده تمایل آن به شرایط خنثی تا کمی قلیایی است (شکل ۱).

تأثیر pH بر رشد باکتری‌ها یکی از عوامل کلیدی در متابولیسم میکروبی محسوب می‌شود، به ویژه در محیط‌های که نفت خام تنها منبع کربن است. در این مطالعه، باکتری *Methylochromatium* sp. بیشترین رشد را در pH ۷/۵ داشت که بیانگر مطلوب بودن شرایط خنثی تا کمی قلیایی برای رشد و تجزیه نفت خام توسط این نوع از باکتری است. کاهش رشد در شرایط اسیدی می‌تواند ناشی از کاهش فعالیت آنزیم‌ها، ناپایداری غشای سلولی یا اختلال در مسیرهای متابولیسم هیدروکربن‌ها باشد (Varjani, 2017). این نتایج با مطالعات پیشین که عملکرد بهینه باکتری‌های مصرف‌کننده هیدروکربن را در شرایط

که ترکیبات نفت خام به راحتی درون ماتریس نفوذ کرده و با سلول‌های باکتریایی تثبیت شده تماس مؤثری برقرار کنند. این ویژگی موجب افزایش دسترسی باکتری‌ها به سوبسترا و در نتیجه بهبود کارایی تجزیه زیستی نفت خام شد؛ موضوعی که نتایج تجربی این پژوهش نیز آن را تأیید می‌کند. همچنان، مطالعات پیشین نشان داده‌اند که دانه‌های آژینات با قطر بزرگتر، به طور معمول در حذف آلاینده‌های نظیر فنول و نفت خام از کارایی پایین‌تری برخوردارند (Aksu and Bülbül, 1999; Partovinia et al., 2023).

شکل ۳ نمایی از ساختارهای داخلی میکروپسول‌های کلسیم-آژینات و سلول‌های باکتریایی تثبیت شده درون آن‌ها را نشان می‌دهد. این تصاویر به خوبی ویژگی‌های متخلخل دانه‌های آژیناتی را به تصویر می‌کشند که با فراهم‌سازی نسبت بالای سطح به حجم، امکان چسبندگی مؤثر و رشد مناسب سلول‌های باکتریایی را فراهم کرده‌اند. این شکل همچنان نشان می‌دهد که حفاظت فیزیکی ایجاد شده توسط ماتریس آژیناتی و تراکم بالای سلولی درون دانه‌ها، شاید موجب افزایش پایداری و تقویت فعالیت متابولیکی باکتری‌ها شده است. این مشاهدات با نتایج گزارش شده در مطالعات پیشین نیز مطابقت دارد (Liang et al., 2009; Partovinia et al., 2023).

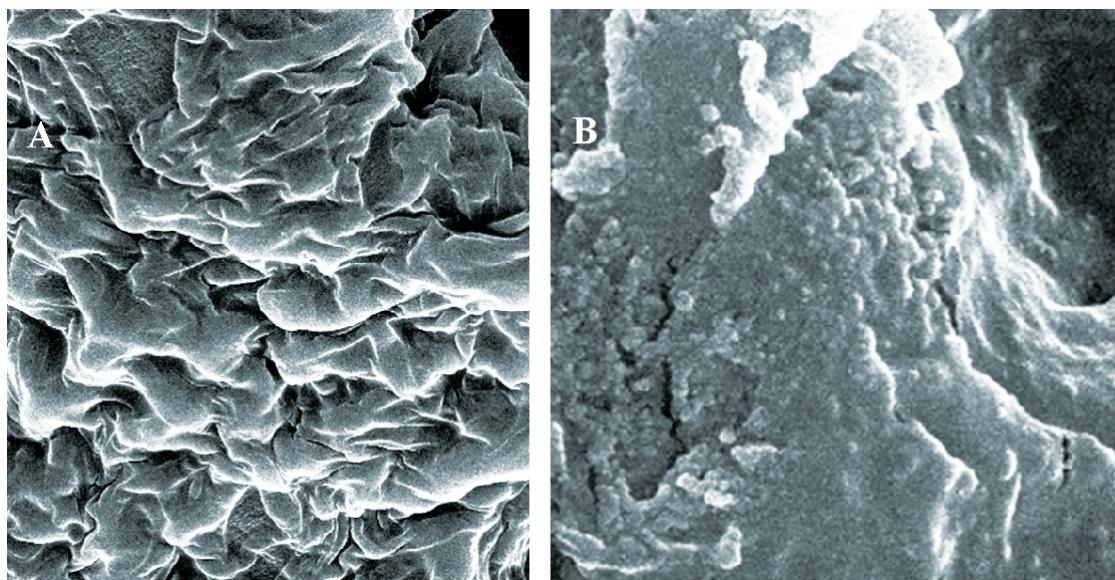
(Salam et al., 2015) این تفاوت‌ها در نرخ رشد ممکن است ناشی از ویژگی‌های ژنتیکی و متابولیکی ذاتی گونه‌ها یا میزان سازگاری آن‌ها با شرایط محیطی باشد؛ زیرا گونه‌های مختلف نسبت‌های متفاوتی از کربن مصرفی را به زیست‌توده و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌کنند (Salam et al., 2015).



شکل ۲. نرخ رشد باکتری *Methylorubrum* sp. در محیط MSM حاوی چهار درصد نفت خام. "CO" نشان‌دهنده نفت خام و «Control» به محیط MSM حاوی یک درصد گلوکز اشاره دارد.

### سلول‌های تثبیت شده با میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی (FESEM)

در این مطالعه، از دانه‌های آژینات سدیم با اندازه یکنواخت و قطری در حدود یک میلی‌متر برای تثبیت باکتری‌ها استفاده شد. اندازه کوچک این دانه‌ها موجب شد



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با نشر میدانی (FE-SEM) از ساختار دانه‌های آژینات کلسیم، (A) دانه کنترل بدون سلول‌های باکتریایی، (B) سلول‌های باکتریایی تثبیت شده پس از هفت روز تجزیه زیست

## تحلیل GC-MS

به عنوان نمونه، اکتان در سیستم سلول آزاد تنها ۲۲/۵ درصد تجزیه شده، در حالی که در سیستم تشییت شده این مقدار به ۴۴/۵ درصد افزایش یافته است. این اختلاف عملکرد در آلکان‌های با وزن مولکولی بالاتر مانند دودکان، تترادکان و هگزادکان نیز قابل مشاهده است؛ به طوری که درصد تخریب در سلول‌های تشییت‌شده به مراتب بیشتر از سلول‌های آزاد بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تشییت سلول‌ها موجب افزایش پایداری و کارایی آن‌ها در برابر ترکیبات پیچیده‌تر و بلندزنجیره‌تر می‌شود، در حالی که این تفاوت در مورد آلکان‌های سبک چندان مشهود نیست. این یافته‌ها از نظر دقیق و تطابق با نتایج حاصل از آنالیز وزن‌سنجی قابل توجه بوده و یکدیگر را تأیید می‌کنند. به طور خلاصه، سلول‌های تشییت‌شده موفق به حذف حدود ۷۲ درصد از هیدروکربن‌های قابل شناسایی شدنند.

پس از گذشت پنج روز انکوباسیون در حضور چهار درصد نفت خام و استفاده از دو سیستم آزاد و تشییت شده، نمونه‌های تجزیه‌شده و کنترل با استفاده از روش طیف‌سنجی جرمی-کروماتوگرافی گازی (GC-MS) تجزیه و تحلیل شدند. شناسایی ساختار ترکیبات بر اساس زمان نگهداری در دستگاه GC-MS و نتایج طیف جرمی آنها در جدول ۱ ارائه شده است. جدول مقایسه‌ای نشان می‌دهد که دو سیستم زیستی شامل سلول آزاد و سلول تشییت‌شده که در تحریب n-آلکان‌ها و مشتقات آن Mythylorubrum sp. عملکرد متفاوتی دارند. در ترکیبات سبک‌تر مانند بوتان، پنتان و ایزومرهای متیله‌شده آن‌ها (C<sub>4</sub>-C<sub>6</sub>)، هر دو سیستم کارایی ۱۰۰ درصدی از خود نشان داده‌اند، اما با افزایش طول زنجیره کربنی و شاخه‌دار شدن ساختار مولکولی، عملکرد سیستم سلول آزاد به طور چشم‌گیری کاهش یافته است.

جدول ۱. کارایی تجزیه مربوط به n-آلکان‌ها در دو سیستم سلول‌های آزاد و تشییت شده

Retention Time (min)	Compound Name	n-alkane	Methylorubrum sp.- free cell	Methylorubrum sp.- Immobilized
۱/۷۴	Butane	C4	۱۰۰	۱۰۰
۲/۰۶	-Butane, 2-methyl	C5	۱۰۰	۱۰۰
۲/۲۲	Pentane	C5	۱۰۰	۱۰۰
۲/۸۲	-Pentane, 2-methyl	C6	۱۰۰	۱۰۰
۲/۹۹	-Pentane, 3-methyl	C6	۱۰۰	۱۰۰
۳/۱۹	Hexane	C6	۸۵/۴	۹۰/۱
۴/۲۹	-Hexane, 3-methyl	C7	۸۰/۶۷	۹۱/۵
۴/۶۸	Heptane	C7	۹۰/۲	۹۰/۴۵
۵/۸۴	-Heptane, 2-methyl	C8	۸۵/۳	۹۴/۲
۶/۴۸	Octane	C8	۲۲/۵	۴۴/۵
۷/۰۱	-Heptane, 2,6-dimethyl	C9	۸۰/۴۵	۹۰/۲
۷/۵۶	-Heptane, 2,3-dimethyl	C9	۷۹/۵	۸۰/۴۵
۷/۶۸	-Octane, 4-methyl	C9	۲۷/۶	۵۵/۲۱
۷/۸۳	-Octane, 3-methyl	C9	۲۴/۳	۴۸/۶
۸/۳۴	Nonane	C9	۲۸/۹	۴۸/۹
۸/۹۷	-Octane, 2,6-dimethyl	C10	۴۰/۳۱	۶۰/۲
۹/۴۶	-Nonane, 4-methyl	C10	۴۲/۵۱	۵۲/۳۱
۱۰/۱۳	Decane	C10	۵۰/۲	۶۵/۳
۱۰/۵۳	-Decane, 4-methyl	C11	۵۱/۳	۶۰/۲
۱۱/۱۸	-Octane, 3-ethyl	C10	۲۷/۵	۵۴/۳

ادامه جدول ۱.

Retention Time (min)	Compound Name	n-alkane	Methylorubrum sp.- free cell	Methylorubrum sp.- Immobilized
۱۱/۸۳	Undecane	C11	۲۶/۴	۵۶/۷
۱۲/۹۷	-Undecane, 3-methyl	C10	۲۷/۲	۴۹/۵
۱۳/۴۲	Dodecane	C12	۴۲/۵	۶۰/۲
۱۳/۶۳	-Undecane, 2,6-dimethyl	C13	۲۲/۱	۴۴/۸
۱۴/۵۱	-Decane, 2-methyl	C14	۳۵/۳	۶۷/۲
۱۴/۹	Tridecane	C15	۶۱/۲	۶۵/۱۲
۱۶	-Dodecane, 2,6,10-trimethyl	C15	۲۴/۵	۴۸/۲
۱۶/۳۱	Tetradecane	C14	۲۵/۷	۵۰/۷
۱۷/۱۴	Undecane	C11	۲۴	۴۸/۶
۱۷/۶۲	Pentadecane	C15	۴۰/۵	۵۱/۲
۱۸/۸۷	Hexadecane	C16	۳۶/۴	۴۵/۳
۲۰/۰۵	Heptadecane	C17	۳۲/۱	۶۰/۴۵
۲۰/۱۳	Pentadecane, -2,6,10,14-tetramethyl	C15	۳۰/۱	۵۴/۷
۲۱/۱۷	Octadecane	C18	۷۰/۲	۸۰/۱
۲۱/۳	Hexadecane, 2,6,10,14- -tetramethyl	C16	۳۲/۴	۶۰/۳
۲۲/۲۴	Nonadecane	C19	۵۰/۱	۶۷/۲
۲۳/۲۵	Eicosane	C20	۵۶/۲	۶۱/۲
۲۴/۲۲	Heneicosane	C21	۴۸/۷	۶۰/۵
۲۵/۱۵	Docosane	C22	۵۱/۲	۵۹/۹
۲۶/۱۵	Heptacosane	C27	۶۰/۵	۶۲/۳
۲۷/۸	Otadecane,9-Ethyl-9-Heptyl	C27	۵۶/۱	۶۰/۱۴
۲۸/۸		C28	۵۲/۹	۶۵/۴۱

## تجزیه زیستی نفت خام توسط باکتری آزاد و تثبیت شده

داد که میزان حذف نفت خام توسط سلول‌های تثبیت شده

*Methylorubrum sp.* به ۷۰ درصد رسید، در حالی که

این میزان در حالت سلول آزاد تنها ۵۰ درصد بود. این اختلاف ۲۰ درصدی در راندمان تجزیه، نشان‌دهنده نقش قابل توجه تثبیت در افزایش پایداری و عملکرد زیست‌تحمیبی میکروارگانیسم‌ها در شرایط تیمار آلودگی‌های نفتی است (شکل ۵). برای بررسی اثرات غیرزیستی، یک آزمایش کنترل بدون تلقیح میکروبی نیز انجام شد. در این آزمایش مشاهده شد که تنها دو درصد از نفت خام کاهش یافته است که این میزان کاهش به جذب فیزیکی توسط کپسول‌های آژیناتی نسبت داده می‌شود. این مقدار در مقایسه با کل فرآیند تجزیه زیستی بسیار ناچیز بوده و نشان می‌دهد که در مقایسه بین سلول‌های آزاد و تثبیت شده، نتایج نشان

نتایج مربوط به تجزیه نفت خام با استفاده از سلول‌های میکروبی در دو حالت آزاد و تثبیت شده در شکل ۵ ارائه شده‌اند. یافته‌ها نشان دادند که این گونه قادر است هیدروکربن‌های نفتی را به عنوان تنها منبع کربن و انرژی مصرف کند. پس از پنج روز و در محیط حاوی چهار درصد نفت خام، گونه *Methylorubrum sp.* نخ تجزیه‌ای برابر با ۵۰ درصد از خود نشان داد. این نتایج نشان می‌دهد که این باکتری به تنهایی نیز توانایی قابل توجهی در تجزیه نفت خام دارد.

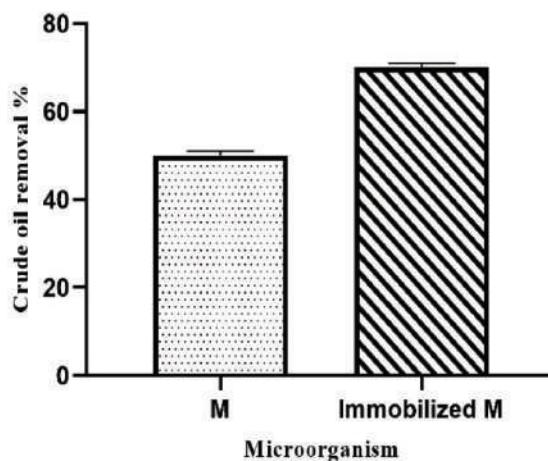
مقابل، سلول‌های تثبیت‌شده قابلیت استفاده مجدد تا ۱۰ چرخه را حفظ کردند که آن‌ها را برای کاربردهای صنعتی مناسب‌تر می‌سازد (Jeon et al., 2019). در مجموع، این شواهد علمی مزایای تثبیت میکروبی در زیست‌پالایی نشت‌های نفتی را به خوبی نشان می‌دهند و تأکید می‌کنند که بهینه‌سازی ترکیب میکروارگانیسم‌ها و طراحی بسترهای تثبیت می‌تواند نقش مهمی در افزایش کارایی تجزیه در شرایط آلودگی‌های مختلف ایفا کند.

### سنجهش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده ترکیبات نفتی

فعالیت اختصاصی آنزیم‌های لیپاز، AlkB و CYP450 در طول چهار بازه زمانی (صفر، ۴۸، ۶۰ و ۷۲ ساعت) اندازه‌گیری شد تا تأثیر زمان بر بیان آنزیم‌ها در میکروارگانیسم مورد مطالعه مشخص شود. نتایج حاصل از نمودار نشان می‌دهد که فعالیت آنزیم‌ها در طی زمان به طور قابل توجهی تغییر کرده است. در مورد آنزیم AlkB، جهش قابل توجهی در فعالیت آنزیم در بازه زمانی ۶۰ ساعت مشاهده شد که بیشترین فعالیت (حدود ۱۳/۵۳ واحد در میلی‌گرم) را نشان داد. این روند سپس در روز سه کاهش یافت که می‌تواند بیانگر پاسخ تنظیمی میکروارگانیسم به شرایط محیطی باشد. آنزیم CYP450 نیز الگوی مشابهی با AlkB نشان داد؛ یعنی از روز صفر تا روز ۶۰ ساعت فعالیت آنزیمی افزایش یافت و پس از ۶۰ ساعت به حداقل خود (حدود ۹/۴۱ واحد در میلی‌گرم) رسید، اما پس از ۷۲ ساعت کاهش داشت (شکل ۵-A). این کاهش در فعالیت آنزیمی شاید به دلیل کاهش قابل توجه آلکان‌ها و ورود سلول‌ها به فاز مرگ رخ داده است. روند فعالیت آنزیم لیپاز با گذشت زمان به صورت تدریجی افزایش یافت. در روز صفر، فعالیت آنزیم بسیار کم بود، اما در ساعات ۴۸ و ۶۰ افزایش یافت و در ۷۲ ساعت به حداقل مقدار خود (حدود ۸/۴ واحد در میلی‌گرم) رسید. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که فعالیت آنزیمی در طی زمان بهویژه تا روز دهم روند افزایشی دارد و پس از آن ممکن است تحت تأثیر سازوکارهای مهاری، تنش‌های محیطی یا تخلیه منابع سلولی کاهش یابد. بیشترین فعالیت اختصاصی

بخش اعظم حذف نفت خام در نتیجه فعالیت‌های زیستی میکروارگانیسم‌ها صورت گرفته است.

شواهد علمی موجود حاکی از آن است که تثبیت میکروارگانیسم‌ها در بسترهایی مانند آلزینات می‌تواند آن‌ها را از تنش‌های محیطی محافظت کرده و موجب افزایش نرخ تجزیه هیدروکربن‌ها گردد. مطالعه‌لی و همکاران *Acinetobacter SHC* (Li et al., 2025) نشان داد که (Li et al., 2025) تثبیت‌شده توانست در شرایط سخت، از جمله پنج گرم در لیتر نفت خام، pH برابر با ۱۰ و شوری سه درصد، به ترتیب ۴۵، ۴۵ و ۲۲ درصد نفت را تجزیه کند؛ عملکردی که درصد بیشتر از سلول‌های آزاد بود و پتانسیل بالای این روش را برای کاربردهای زیست‌پالایی در محیط‌های با تنش شدید نشان می‌دهد (Li et al., 2025).



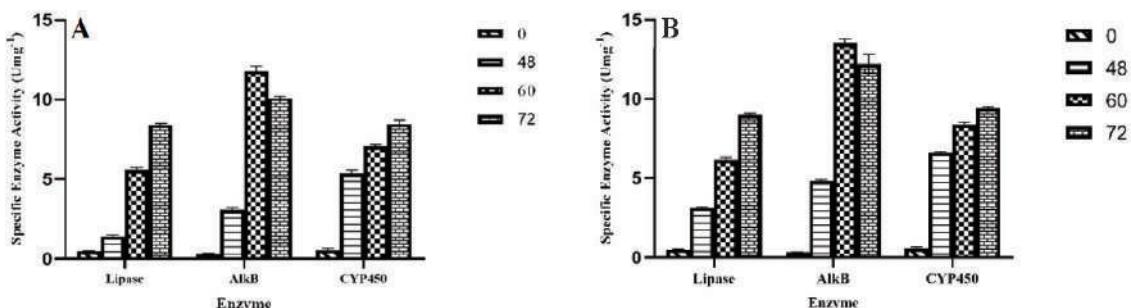
شکل ۵. راندمان حذف نفت خام توسط باکتری *Methylorubrum sp.* آزاد و تثبیت‌شده

سویه DG17 نیز که در بسترهای آلزینات سدیم، آتاپولزیت و کربنات کلسیم تثبیت شده بود، در خاک آلوده به نفت خام بین ۳۳/۵۶ تا ۵۶/۸۲ درصد از کل هیدروکربن‌ها را طی ۲۰ روز حذف کرد. افودن کربنات کلسیم موجب افزایش تخلخل بستر و بهبود نفوذ نفت به سلول‌ها شد (Wang et al., 2014). جون و همکاران (Jeon et al., 2019) بیان کردند که اگرچه سلول‌های آزاد در ابتدا نرخ تجزیه بالاتری (۱۴/۷ تا ۳۱/۶ درصد) را نشان دادند، اما کارایی آن‌ها پس از یک چرخه کاهش یافت. در

پایداری آنزیمی بالاتر در شرایط ثبیت شده است. سیتوکروم p450 نیز الگوی مشابهی را نشان داد. فعالیت آن از کمتر از یک واحد در روز صفر به حدود ۹/۵ واحد در روز سه رسید و به مقدار متناظر در سلول های آزاد (حدود ۸/۴ واحد در روز سه) باز هم بیشتر است. فعالیت لیپاز در سلول های ثبیت شده روند افزایشی به نسبت پایداری داشت و از مقدار کمتر از یک واحد در روز صفر به حدود ۶ واحد در روز سه رسید. این مقدار نسبت به حالت آزاد حدود یک واحد بیشتر است که نشان دهنده اثربخشی ثبیت بر حفظ و ارتقای فعالیت آنزیم در مدت زمان طولانی تر است (شکل ۶-B).

در آنزیم AlkB دیده شد که نشان دهنده نقش کلیدی آن در پاسخ به شرایط مورد بررسی است.

نتایج حاصل از فعالیت اختصاصی آنزیم های بازهای زمانی صفر، ۴۸، ۶۰ و ۷۲ ساعت نشان داد که ثبیت سلول ها تأثیر قابل توجهی بر افزایش فعالیت آنزیمی در مقایسه با سلول های آزاد دارد. در مورد AlkB، فعالیت آنزیم در سلول های ثبیت شده در ۶۰ ساعت به بیش از ۱۳ واحد رسید که در مقایسه با حدود ۱۱ واحد در سلول های آزاد، افزایش قابل توجهی دارد. این افزایش همچنان در روز سه همچنان بالا باقی ماند (حدود ۱۲ واحد) که نشان دهنده



شکل ۶. فعالیت اختصاصی آنزیم ها در گونه *Methylorubrum* sp. تحت شرایط چهار درصد نفت خام در مقایسه با کنترل، در دو سیستم متفاوت (سلول آزاد و سلول ثبیت شده) و در زمان های مختلف گرمگذاری (صفر، ۴۸، ۶۰ و ۷۲ ساعت، (A) فعالیت اختصاصی آنزیم ها در سیستم سلول آزاد، (B) فعالیت اختصاصی آنزیم ها در سیستم سلول ثبیت شده. معناداری آماری با استفاده از آزمون چند مقایسه ای توکی<sup>1</sup> انجام شد و مقدار p کمتر از ۰/۰۱ به عنوان معناداری در نظر گرفته شد

تجزیه n-هگزادکان ایفا می کند. پارسیپان و همکاران (Parthipan et al., 2018) نیز نشان دادند که آنزیمی از *Bacillus subtilis* A1 بیش از ۷۶ درصد از آلکان های C15 تا C19 از طریق فعالیت آنزیم آلکان هیدروکسیلаз تجزیه شدند. آدلان و همکاران (Adlan et al., 2020) قادر بودند بیش از ۷۰ درصد از پارافین را در مدت کمتر از سه روز تجزیه کنند. در میان این باکتری ها، سویه AD24 بالاترین سطح فعالیت آنزیم آلکان مونواکسیژناز را نشان داد. همچنان، گونه هایی مانند N3A7 و DFY1 نیز با فعالیت بالای آنزیم های لیپاز و استراز، توانمندی بالایی در تجزیه ترکیبات هیدروکربنی از خود نشان دادند. در مطالعه ای دیگر، الومالی و همکاران

در دهه های اخیر، مسیرهای زیستی تجزیه هیدروکربن ها و آنزیم های کلیدی در این فرایندها به طور گستردۀ مطالعه شده اند (Hassanshahian et al., 2012; Kothari et al., 2013). آنزیم هایی مانند آلکان مونواکسیژناز غیرهمی نقش اصلی در اکسیداسیون آلکان های زنجیره کوتاه و متوسط ایفا می کنند (Van Beilen et al., 1994). در مقابل، هیدروکربن های بلندتر (بیش از ۲۰ کربن) توسط آنزیم هایی نظیر سیتوکروم P450 تجزیه می شوند (Nie et al., 2011; Van Beilen and Funhoff, 2005). (۲۰۱۲) Mishra and Singh گزارش کردند که در سویه های Rhodococcus و Pseudomonas aeruginosa PSA5 sp. NJ2، آنزیم آلکان هیدروکسیلаз نقش کلیدی در

1. Tukey

International Journal of Environmental Sciences and Natural Resources. 11(3), 1-7. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2018.11.555811>.

- Aksu, Z. and Bülbül, G., 1999. Determination of the effective diffusion coefficient of phenol in Ca-alginate-immobilized *P. putida* beads. Enzyme and microbial technology. 25(3-5), 344-348. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(99\)00051-4](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(99)00051-4).

- Baltaci, M. O., Omeroglu, M. A., Ozkan, H., Taskin, M. and Adiguzel, A., 2024. Enhanced biodegradation of crude oil contamination by indigenous bacterial consortium under real conditions. Biocatalysis and Biotransformation. 42(1), 56-67. <https://doi.org/10.1080/10242422.2023.2231592>.

- Elijah, A. A., 2022. A review of the petroleum hydrocarbons contamination of soil, water and air and the available remediation techniques, taking into consideration the sustainable development goals. Earthline Journal of Chemical Sciences. 7(1), 97-113. <https://doi.org/10.34198/ejcs.7122.97113>.

- Eroglu, E., Smith, S. M. and Raston, C. L., 2015. Application of various immobilization techniques for algal bioprocesses. Biomass and biofuels from microalgae: Advances in engineering and biology, 19-44. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16640-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16640-7_2).

- Fatajeva, E., Gailiūtė, I., Paliulis, D. and Grigiškis, S., 2014. The use of *Acinetobacter* sp. for oil hydrocarbon degradation in saline waters. Biologija. 60(3). <https://doi.org/10.6001/biologija.v60i3.2971>.

- Godec, M. L. and Biglarbigi, K., 1991. Economic effects of environmental regulations on finding and developing crude oil in the US. Journal of Petroleum Technology. 43(01), 72-79. <https://doi.org/10.2118/20619-PA>.

- Hassanshahian, M., Emtiazi, G. and Capello, S., 2012. Isolation and characterization

(Elumalai et al., 2021) نشان دادند که کنسرسیوم میکروبی متشكل از *Pseudomonas* و *Bacillus subtilis* قادر است آلاینده‌های آلی آب‌گریز را با کارابی بالای تجزیه کند. بر اساس گزارش آن‌ها، نرخ حذف برای نفت خام، دیزل، C40 و C32 به ترتیب ۸۴، ۹۰، ۷۶ و ۷۲ درصد بود. آنزیم‌های کلیدی مانند آلکان هیدروکسیلاز، الكل دهیدروژناز و لیپاز در این فرایند نقش اساسی ایفا کردند و نشان دهنده توان بالای این کنسرسیوم در زیست‌تخریب ترکیبات پیچیده هیدروکربنی هستند.

## نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان دادند که تثبیت باکتری *Methylorum sp.* در بستر آژیناتی، روشی مؤثر برای افزایش پایداری، بازده و توان تجزیه زیستی آلاینده‌های نفتی است. سلول‌های تثبیت شده نه تنها توانستند میزان بیشتری از نفت خام را تجزیه کنند، بلکه فعالیت اختصاصی آنزیم‌های AlkB، CYP450 و لیپاز نیز به طور معناداری نسبت به حالت سلول آزاد بالاتر بود. تجزیه مؤثر آلکان‌های سنگین، به ویژه در بازه زمانی سه روز، بیانگر قابلیت این سیستم در حذف ترکیبات پیچیده و ماندگار نفتی است. در مجموع، این مطالعه نقش مهم تثبیت سلولی در ارتقاء عملکرد زیست‌پالایی را تأیید می‌کند و پیشنهاد می‌دهد که ترکیب سویه‌های توانمند مانند *Methylorum sp.* با فناوری تثبیت، رویکردی پایدار و کارآمد برای پاکسازی آلودگی‌های نفتی در مقیاس‌های صنعتی باشد.

## منابع

- Adlan, N. A., Sabri, S., Masomian, M., Ali, M. S. M. and Rahman, R. N. Z. R. A., 2020. Microbial biodegradation of paraffin wax in Malaysian crude oil mediated by degradative enzymes. Frontiers in Microbiology. 11, 565608. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.565608>.
- Ahmed, F. and Fakhruddin, A., 2018. A review on environmental contamination of petroleum hydrocarbons and its biodegradation.

- of crude-oil-degrading bacteria from the Persian Gulf and the Caspian Sea. *Marine pollution bulletin.* 64(1), 7-12. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.11.006>.
- Jauhari, N., Mishra, S., Kumari, B. and Singh, S. N., 2014. Bacteria-mediated aerobic degradation of hexacosane in vitro conditions. *Bioresource technology.* 170, 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.091>.
  - Jeon, Y., Bissessur, A. and Singh, P., 2019. Novel immobilization techniques of *Acinetobacter* (V2) and *Paenibacillus* (D9) bacterial strains for waste oil degradation. *Biotechnology and Biotechnological Equipment.* 33(1), 911-920. <https://doi.org/10.1080/13102818.2019.1628663>.
  - Jett, B. D., Hatter, K. L., Huycke, M. M. and Gilmore, M. S., 1997. Simplified agar plate method for quantifying viable bacteria. *Biotechniques.* 23(4), 648-650. <https://doi.org/10.2144/97234bm22>.
  - Kadri, T., Rouissi, T., Magdouli, S., Brar, S. K., Hegde, K., Khiari, Z., Daghrir, R. and Lauzon, J.-M., 2018. Production and characterization of novel hydrocarbon degrading enzymes from *Alcanivorax borkumensis*. *International journal of biological macromolecules.* 112, 230-240. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.177>.
  - Khanpour-Alikelayeh, E., Partovinia, A., Talebi, A. and Kermanian, H., 2020. Investigation of *Bacillus licheniformis* in the biodegradation of Iranian heavy crude oil: A two-stage sequential approach containing factor-screening and optimization. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 205, 111103. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111103>.
  - Kim, Y.-H., Freeman, J. P., Moody, J. D., Engesser, K.-H. and Cerniglia, C. E., 2005. Effects of pH on the degradation of phenanthrene and pyrene by *Mycobacterium vanbaalenii* PYR-1. *Applied microbiology and biotechnology.* 67, 275-285. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1796-y>.
  - Kothari, V., Panchal, M., and Srivastava, N., 2013. Microbial degradation of hydrocarbons.
  - Laothamteep, N., Naloka, K., and Pinyakong, O., 2022. Bioaugmentation with zeolite-immobilized bacterial consortium OPK results in a bacterial community shift and enhances the bioremediation of crude oil-polluted marine sandy soil microcosms. *Environmental Pollution.* 292, 118309. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118309>.
  - Lee, G. M., Gray, J. J. and Palsson, B. Ø., 1991. Effect of trisodium citrate treatment on hybridoma cell viability. *Biotechnology techniques.* 5, 295-298. <https://doi.org/10.1007/BF02438666>.
  - Li, J., Zhang, H., Mei, K., Sun, L., Wang, L. and Liang, C., 2025. Enhanced degradation of petroleum hydrocarbons by immobilizing *Acinetobacter*. *Biochemical Engineering Journal.* 217, 109666. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2025.109666>.
  - Liang, Y., Zhang, X., Dai, D. and Li, G., 2009. Porous biocarrier-enhanced biodegradation of crude oil contaminated soil. *International Biodegradation and Biodegradation.* 63(1), 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.07.005>.
  - Maki, A. A., Al-Taee, A. M. and Atwan, Z. W., 2023. Measuring the Degradation of Aromatic Compounds Using *Methylorubrum ex-torquens* Isolated from Oil-Contaminated Soils in Southern Iraq. *Mesopotamian Journal of Marine Sciences.* 38(1), 9-20. <https://doi.org/10.58629/mjms.v38i1.323>.
  - Mishra, S. and Singh, S., 2012. Microbial degradation of n-hexadecane in mineral salt medium as mediated by degradative enzymes. *Bioresource technology.* 111, 148-154. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.049>.
  - Mohanta, S., Pradhan, B., and Behera, I. D., 2024. Impact and remediation of petroleum hydrocarbon pollutants on agricultural land: a re-

- view. *Geomicrobiology Journal*. 41(4), 345–359. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2243925>.
- Moreno-García, J., García-Martínez, T., Mauricio, J. C. and Moreno, J., 2018. Yeast immobilization systems for alcoholic wine fermentations: actual trends and future perspectives. *Frontiers in Microbiology*. 9, 241. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00241>.
  - Ngene, S., Tota-Maharaj, K., Eke, P. and Hills, C., 2016. Environmental and economic impacts of crude oil and natural gas production in developing countries. *International Journal of Economy, Energy and Environment*. 1(3), 64–73. <https://doi.org/10.11648/j.ijeee.20160103.13>.
  - Nie, Y., Liang, J., Fang, H., Tang, Y.-Q. and Wu, X.-L., 2011. Two novel alkane hydroxylase-rubredoxin fusion genes isolated from a *Dietzia* bacterium and the functions of fused rubredoxin domains in long-chain n-alkane degradation. *Applied and environmental microbiology*. 77(20), 7279–7288. <https://doi.org/10.1128/AEM.00203-11>.
  - Obayori, O. S., Salam, L. B. and Ogunwumi, O. S., 2014. Biodegradation of fresh and used engine oils by *Pseudomonas aeruginosa* LP5. *Bioremediation and Biodegradation*. 5(213), 1–7. <http://dx.doi.org/10.4172/2155-6199.1000213>.
  - Omotosho, O., 2024. Degradation of Crude Oil by Microbial Populations of Lagos Lagoon Water Microcosms. The 3rd International Electronic Conference on Processes-Green and Sustainable Process Engineering and Process Systems Engineering. 105(1). <https://doi.org/10.3390/proceedings2024105082>.
  - Parthipan, P., Preetham, E., Machuca, L. L., Rahman, P. K., Murugan, K. and Rajasekar, A., 2017. Biosurfactant and degradative enzymes mediated crude oil degradation by bacterium *Bacillus subtilis* A1. *Frontiers in microbiology*. 8, 193. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00193>.
  - Partovinia, A., Khanpour-Alikelayeh, E., Talebi, A. and Kermanian, H., 2023. Improving mass transfer rates in microbial cell immobilization system for environmental applications: synergistic interaction of cells on crude oil biodegradation. *Journal of Environmental Management*. 326, 116729. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116729>.
  - Partovinia, A. and Rasekh, B., 2018. Review of the immobilized microbial cell systems for bioremediation of petroleum hydrocarbons polluted environments. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 48(1), 1–38. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1439652>.
  - Qu, S., Liu, L., Zhang, L., Zheng, M., Feng, J., Liu, C., Miao, Y. and Jing, G., 2023. Biodegradation of crude oil by a moderately haloalkaliphilic *Acinetobacter* strain. *Petroleum Science and Technology*. 41(1), 30–44. <https://doi.org/10.1080/10916466.2022.2041666>.
  - Rezaei Somee, M., Amoozegar, M. A., Shavandi, M. and Dastgheib, S. M. M., 2016. Isolation of halophilic microbial consortia capable of degrading diesel oil for the bioremediation of drilling wastes. *Journal of Microbial Biology*. 5(19), 23–40. <https://doi.org/10.22108/bjm.2016.21005>.
  - Rojas-Gätjens, D., Fuentes-Schweizer, P., Rojas-Jiménez, K., Pérez-Pantoja, D., Avendaño, R., Alpízar, R., Coronado-Ruiz, C. and Chavarría, M., 2022. Methylotrophs and hydrocarbon-degrading bacteria are key players in the microbial community of an abandoned century-old oil exploration well. *Microbial ecology*, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00248-021-01748-1>.
  - Sakdapetsiri, C., Kaokhum, N. and Pin-yakong, O., 2021. Biodegradation of crude oil by immobilized *Exiguobacterium* sp. AO-11 and shelf life evaluation. *Scientific Reports*. 11(1), 12990. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92122-1>.
  - Salam, L. B., Obayori, O. S. and Raji,

- S., 2015. Biodegradation of used engine oil by a methylotrophic bacterium, *Methylobacterium mesophilicum* isolated from tropical hydrocarbon-contaminated soil. *Petroleum Science and Technology*. 33(2), 186-195. <https://doi.org/10.1080/10916466.2014.961610>.
- Schellenberg, K. A. and Hellerman, L., 1958. Oxidation of reduced diphosphopyridine nucleotide. *Journal of Biological Chemistry*. 231(1), 547-556. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)77327-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)77327-X).
  - Singh, S., Kumari, B. and Mishra, S., 2012. Microbial degradation of alkanes. Microbial degradation of xenobiotics, 439-469. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23789-8\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23789-8_17).
  - Sojinu, S. O. and Ejeromedoghene, O., 2019. Environmental challenges associated with processing of heavy crude oils. *Processing of Heavy Crude Oils*. 241.
  - Srividya, A. R. and Vishnuvarthan, V. J., 2014. Immobilization of therapeutically beneficial enzymes
  - Tahmasbizadeh, M., Nikaeen, M., Attar, H. M., Khanahmad, H. and Khodadadi, M., 2025. Resuscitation-promoting factors: novel strategies for the bioremediation of crude oil-contaminated soils. *Environmental Research*, 121085. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121085>.
  - Van Beilen, J. B. and Funhoff, E. G., 2005. Expanding the alkane oxygenase toolbox: new enzymes and applications. *Current opinion in biotechnology*. 16(3), 308-314. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2005.04.005>.
  - Van Beilen, J. B., and Funhoff, E. G., 2007. Alkane hydroxylases involved in microbial alkane degradation. *Applied microbiology and biotechnology*. 74, 13-21. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0748-0>.
  - Van Beilen, J. B., Wubbolt, M. G. and Witholt, B., 1994. Genetics of alkane oxidation by *Pseudomonas oleovorans*. *Biodegradation*. 5, 161-174. <https://doi.org/10.1007/BF00696457>.
  - Varjani, S. J., 2017. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource technology*. 223, 277-286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>.
  - Wang, H. Q., Hua, F., Zhao, Y. C., Li, Y. and Wang, X., 2014. Immobilization of *Pseudomonas* sp. DG17 onto sodium alginate-attapulgite-calcium carbonate. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*. 28(5), 834-842. <https://doi.org/10.1080/13102818.2014.961123>.
  - Wasoh, H., Veeraswamy, K., Gunasekaran, B. and Shukor, M. Y., 2019. Biodegradation of hydrocarbon sludge by *Pseudomonas* sp. strain UPM-KV. *Journal of Environmental Microbiology and Toxicology*. 7(1), 10-15. <https://doi.org/10.54987/jemat.v7i1.473>.
  - Yong, Y.-C. and Zhong, J.-J., 2010. Recent advances in biodegradation in China: new microorganisms and pathways, biodegradation engineering, and bioenergy from pollutant biodegradation. *Process Biochemistry*. 45(12), 1937-1943. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.04.009>.
  - Zhang, X., Kong, D., Liu, X., Xie, H., Lou, X. and Zeng, C., 2021. Combined microbial degradation of crude oil under alkaline conditions by *Acinetobacter baumannii* and *Talaromyces* sp. *Chemosphere*. 273, 129666. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129666>.
  - Zuo, K., Zhang, L., Yao, H. and Wang, J., 2010. Isolation and functional expression of a novel lipase gene isolated directly from oil-contaminated soil. *Acta Biochimica Polonica*. 57(3), 305-311.

# Stream sediment geochemistry: optimum exploration method for copper mineralization in Chah Rostam area, South of Birjand

Moradi, S.<sup>1</sup>, Alipour-Asl, M.<sup>2</sup> and Akbarpour, A.<sup>3</sup>

1. M.Sc. Graduate, Department of Petrology and Economic Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood

2. Associate Professor, Department of Petrology and Economic Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood

3. Assistant Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran

Received: 30 November 2024

Accepted: 5 January 2024

## Abstract

The Chah Rostam prospect area is located in Lut block and in the northwest of Nehbandan in the south of Birjand. Eocene-Oligocene volcanic and pyroclastic rock units with porphyritic andesite and andesite-basalt cover a major part of this area, which are crosscutting by the Late Eocene-Oligocene intrusive and sub-volcanic rocks with composition of porphyry granodiorite, monzodiorite, quartz diorite and dacitic dikes. Hydrothermal fluids related to the subvolcanic-intrusive bodies have played an important role in the copper mineralization and accompanied elements in this area. samples were taken from stream sediments (the -80 mesh) then pulverized to -200 mesh size and analyzed for Au by fire assay and 22 elements using inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES) methods. Univariate and multivariate statistical analysis of the stream sediments geochemical data represent Cu, Au, Zn, Pb, Mo, As, Sb, and Mn anomalies in the Chah Rostam area. Geochemical association of elements in the stream sediment samples indicates the possible occurrence of porphyry and epithermal copper mineralization (especially epithermal system) in this area. Litho-geochemical surveying based on the outcrops and drilling core samples in the stream sediment anomaly areas confirms the capability of the stream sediment geochemistry method to identify geochemical halos related to mineralization systems.

**Keywords:** South of Birjand, Chah Rostam, Stream sediment geochemistry, Copper mineralization.

# Geology, mineralogy, geochemistry, and fluid inclusion study of iron oxide-apatite deposit in the West of Golestanabad, northeast of Zanjan

Arab Zozani, D.<sup>1</sup>, Tajeddin, H.A.<sup>2</sup> and Ghaderi, M.<sup>3</sup>

1. M.Sc.graduated, Department of Economic Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran

2. Assistant Professor, Department of Economic Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran

3. Professor, Department of Economic Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran

Received: 18 September 2024

Accepted: 10 November 2024

## Abstract

The West of Golestanabad deposit is located 13 km northwest of Zanjan, within the Tarom subzone of the Western Alborz-Azerbaijan structural zone. The rocks in the deposit area predominantly consist of an Eocene volcano-pyroclastic sequence of tuff and lava ranging from andesite to trachyandesite in composition intruded by a monzodiorite-monzogabbro subvolcanic intrusive with an Upper Eocene-Oligocene age. The intrusive rocks have calc-alkaline affinity and are classified as metaluminous-peraluminous I-type magmas. Magmatism of the area is synorogenic to post-orogenic and related to active continental margin environments. Mineralization in the West of Golestanabad occurs as vein-veinlets, brecciated, massive, and disseminated iron oxide-apatite within the monzodiorite-monzogabbro intrusions. Mineral assemblages of the deposit consist of magnetite, hematite, pyrite, chalcopyrite, chalcocite, covellite, iron hydroxide minerals, apatite, actinolite, tremolite, quartz, epidote, chlorite and sericite. The main alteration minerals are actinolite, quartz, sericite, epidote, and minor sulfide minerals, which are associated with the iron oxide-apatite ores. Similar REE patterns of apatite and magnetite with host rock samples demonstrate a genetic link between the iron oxide-apatite mineralization and monzodiorite-monzogabbro intrusions. Fluid inclusion studies on the apatite indicate homogenization temperatures between 347 and 547°C and salinity from 5.86 to 21.68 wt.% NaCl eq. for the two-phase (LV) inclusions. The study indicates that the main characteristics of the geology and mineralization in the West of Golestanabad deposit are similar to those of the iron oxide- apatite (IOA) type deposits.

**Keywords:** Fluid inclusions, Geochemistry, Magnetite-apatite mineralization, West of Golestanabad, Zanjan.

# Mineral chemistry and geochemistry of trace and REEs in the ultramafic rocks in the west of Maku

Modjarrad, M.<sup>1</sup>

1. Associated Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 17 July 2024

Accepted: 29 July 2024

## Abstract

Late Cretaceous ultramafic rocks of the Neo-Tethyan ophiolite are located in the western Maku near the Iran-Turkey border as small, scattered bodies in vast areas. This part of Iran's territory belongs to the South Armenian Block (SAB), is Gondwanan, and is near the northern Neo-Tethyan suture. This study is focused on rock classification, residual phase composition, and mantle rock formation setting, using exact field relation observation, crystal chemistry studies, and whole rock chemistry accompanied by trace and rare earth elements investigations. The studied rocks were highly serpentized, Ca-poor, and hydrated. These mantle rocks undergone a high degree of partial melting and were completely depleted from the incompatible elements. Therefore, their abundance was measured using a special method. The main phases are forsterite, enstatite, diopside, and chromian-spinel which are seen in the chrysotile-lizarditic serpentinitized matrix. The U-shape rare earth elements pattern of the western Maku serpentinites is recorded as crustal contamination evidence. Additionally, based on the whole rock chemistry, diagrams and relations between major oxide and trace elements, the studied ultramafic rocks of western Maku belong to the subducted serpentinites group. Also, they represented high refertilization values by fluid/rock interactions on them. Hence, the enrichment of fluid mobile elements (FMEs) such as U, Pb, and Sr results from secondary events occurring during exhumation.

**Keywords:** Ophiolite, Rare earth elements pattern, Serpentinite, Crystal chemistry, Maku.

# Sedimentary facies study of the Faraghan Formation in the Persian Gulf fields and reservoir quality evaluation using well logs

Sfidari, E.<sup>1</sup> and Amraie, J.<sup>2</sup>

1. Assistant Professor of Petroleum geology, Research Institute of Applied Sciences (RIAS), Tehran,

Iran

2. Assistant Professor of sedimentology, National Iranian Oil Company (NIOC)

Received: 12 July 2024

Accepted: 20 August 2024

## Abstract

Reservoir rocks are of great importance in reservoir studies in terms of hydrocarbon storage. In recent years, following increased exploration activities and improved exploration methods, reservoir rocks related to the Paleozoic era have gained special importance throughout the Middle East, especially in Southern part of the Persian Gulf. The lithological characteristics and depositional environment of this sequence are important parameters that affect their reservoir quality. Therefore, this study examines the sedimentological characteristics and determines the facies of the Faraghan Formation using sedimentological studies in four wells from Iran's offshore fields and correlates it using the concept of log facies in fields that have been drilled down to the Faraghan Formation.

Based on petrographic studies of drilling cuttings, six petrofacies including sandstone, sandy shale, red siltstone, black and green shale, limestone, and mixed petrofacies were identified in the cored well. These petrofacies were classified into four depositional environments (accompanied by facies associations): coastal plain, shoreface, offshore-transition, and offshore. Based on the available data from well logs, 6 log facies were identified in a well where sedimentary facies were extracted. The correlation of the log facies results with the sedimentary facies and the facies association indicate good correlation. Log facies 1 is composed of limestone, log facies 2 and 3 are sandy, log facies 4 is sandy with shale content, log facies 5 is shaly, and log facies 6 contains red-colored shales. The variation in log facies distribution in the wells drilled in the Faraghan Formation indicates significant changes in the lateral depositional environment of the Faraghan Formation.

The reservoir quality analysis of the log facies indicates that log facies 2 and 4 have the best reservoir quality. These mentioned facies are most abundant in the Faraghan 2 (F2) and Faraghan 1 (F1) sections. Therefore, it can be concluded that the best interval in terms of reservoir quality belongs to zones 2 and 1 of the Faraghan Formation.

**Keywords:** Faraghan Formation, Sedimentary facies, log facies, reservoir quality.

# Stratigraphic changes of the Seymareh Member in the southwest-northeast trend in the Lurestan structural subzone, Zagros Basin

Bazvand, A.<sup>1</sup>, Sadeghi, A.<sup>2</sup>, Adabi, M. H.<sup>3</sup>, Jamali, A. M.<sup>4</sup> and Hadavandkhani, N.<sup>5</sup>

1. Ph.D. student of stratigraphy and paleontology, Department of Sedimentary Basins and Petroleum, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Sedimentary Basins and Petroleum, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3. Professor, Department of Sedimentary Basins and Petroleum, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

4. Ph.D. in stratigraphy and paleontology, National Iranian Oil Company, Exploration Directorate, Tehran, Iran

5. Ph.D. in stratigraphy and paleontology, Department of Sedimentary Basins and Petroleum, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 10 March 2025

Accepted: 9 April 2025

## Abstract

In order to study and compare the stratigraphy of the Seymareh Member (*Lopha* Limestone Member) in a southwest-northeast trend in the Lurestan subzone, three stratigraphic sections of the Gurpi Formation containing the Seymareh Member, including the Sheikh-Makan section (Kabir-kuh Anticline), the Bagh-Gol section (Sultan Anticline), and the Siah-Darreh section (Zangul Anticline), were studied and then compared with other studied sections along the trend. The Seymareh Limestone has the greatest thickness in the southwestern areas of the Lurestan, so that in the studied sections, its maximum thickness is 43 meters and belongs to the Kabir-kuh Anticline, and then it gradually decreases in thickness towards the northeastern areas so that some of its rock units are no longer visible. This reduction in thickness reaches 8 meters in the Sultan Anticline, then less than 1 meter in the Zangul Anticline, and finally disappears. The decrease in the thickness of the Seymareh Member towards the northeast of the Lurestan is influenced by the tectonic movements of the Zagros foreland Basin, so that gradually towards the northeast of the Lurestan, with increasing depth, the sedimentation of this shallow member has decreased. The age of the Seymareh Member, based on the biozones identified at its lower and upper boundaries, is Middle Campanian in all three stratigraphic sections studied.

**Keywords:** *Lopha* Limestone, Gurpi Formation, Sultan Anticline, Lithostratigraphy.

# Comparative Evaluation of *Methylorubrum* sp. for Crude Oil Degradation in Free and Immobilized Systems: A Functional Enzymatic Approach

Parsa, M.<sup>1</sup> and Nazeri, S.<sup>2</sup>

1. Ph.D. student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2. Associated Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Received: 10 March 2025

Accepted: 9 April 2025

## Abstract

Crude oil spills and the persistence of hydrocarbon compounds in the environment pose significant threats to both human health and ecological integrity. These pollutants—due to their toxicity, chemical stability, and tendency to accumulate in water and soil—disrupt trophic interactions and exacerbate environmental degradation. Bioremediation using microorganisms offers an effective, cost-efficient, and environmentally sustainable strategy for mitigating such contamination.

In this study, the crude oil degradation capacity of *Methylorubrum* sp. was evaluated under both free-living and sodium alginate-immobilized conditions. The activities of three key enzymes involved in hydrocarbon catabolism—alkane monooxygenase, cytochrome P450, and lipase—were also assessed.

Under exposure to 4% (3200 mg/L) crude oil, free cells degraded approximately 50% of the petroleum hydrocarbons, whereas alginate immobilization enhanced degradation efficiency to 70%. Gas chromatography–mass spectrometry (GC-MS) analysis demonstrated complete degradation of light n-alkanes (C<sub>4</sub>–C<sub>9</sub>) and up to 74% degradation of long-chain n-alkanes (C<sub>14</sub>–C<sub>28</sub>) in the immobilized treatment. Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) confirmed the porous architecture of the alginate beads and uniform entrapment of bacterial cells. On day three, the immobilized cells exhibited peak specific activities of alkane monooxygenase, cytochrome P450, and lipase at 13.55, 9.5, and 9.0 U/mg protein, respectively.

Overall, immobilization improved microbial stability, conferred resistance to environmental stress, and significantly enhanced crude oil biodegradation. These findings demonstrate the potential of immobilized *Methylorubrum* sp. for effective crude oil bioremediation and represent a promising step toward the development of scalable, safe, and environmentally responsible approaches to managing petroleum pollution.

**Keywords:** Alkane monooxygenase, *Methylorubrum* sp., Cell immobilization, Cytochrome P450, Lipase.



## Iranian Journal of Geology

Vol. 19, No. 73, Spring 2025



Research Institute of Applied Sciences  
(ACECR)

**License Holder:**

Research Institute of Applied Sciences (ACECR)

**Editorial Director:**

Dr. Khodaei, K., Associate Professor - Research Institute of Applied Sciences



**Editor in Chief:**

Dr. Adabi, M.H., Professor - Shahid Beheshti University

**Assistant Editor:**

Dr. Nassery, H.R., Professor - Shahid Beheshti University

**Editorial Board:**

Dr. Adabi, M.H., Professor - Shahid Beheshti University

Dr. Nassery, H.R., Professor - Shahid Beheshti University

Dr. Rezaei, M.R., Professor - Curtin University of Australia

Dr. Raeisi, E., Professor - Shiraz University

Dr. Saeedi, A., Associate Professor - Geological Survey of Iran

Dr. Ghazban, F., Professor - Tehran University

Dr. Fatemi Aghda, S.M., Professor - Kharazmi University

Dr. Gharshi, M., Associate Professor - Geological Survey of Iran

Dr. Ghavidel, M., Professor of Institute of Petroleum Engineering - Tehran University

Dr. Moore, F., Professor - Shiraz University

Dr. Mousavi Harami, R., Professor - Ferdowsi University Mashhad

Dr. Mirzaei, S., Professor - Research Institute of Applied Sciences (ACECR)

Dr. Vossoughi Abedini, M., Associate Professor - Shahid Beheshti University

Dr. Khodaei, K., Associate Professor - Research Institute of Applied Sciences (ACECR)

Dr. Kohandel, A., Associate Professor - Research Institute of Applied Sciences (ACECR)

**Manager:** Hatefi, R., Assistant Professor - Research Institute of Applied Sciences

**Executive Director:** Esmaili, E.

**Editors:** Dr. Nassery, H.R. and Faezi, N.

**Designer:** Ansari, A.

**Published:** Spring 2025

**Print:** Toos

**Print address:** Eneghlab, at the beginning of Azadi St., in front of Bank Mellat, Tehran, Iran

**Office address:** Shahid Beheshti University, Evin, Tehran, Iran, P.O.Box. 196151171

**Tel:** +98(21)29902594-22431933-4

**E-mail:** zaminshenasiiran@yahoo.com

**Website Journal:** Journal.rias.ac.ir

**Website:** www.rias.ac.ir

This Quarterly Review of Science-Research to Number 3/309 and History 16 April 2008 from the Ministry of Science, Research and Technology.

**This journal is indexed in the following sites:**

<http://www.isc.gov.ir>; <http://www.srlst.com>; <http://www.sid.ir>; <http://www.magiran.com>