

زمین شناسی ایران

سال ۱۹، شماره ۷۴، تابستان ۱۴۰۴

فهرست

- طراحی اندازه و ابعاد بهینه بلوک های تخمین ذخیره بر اساس معیار های مختلف (مورد مطالعه: کانسار طلای زرزیمای موشی)
رضا احمدی و هانیه شاهزamani ۱
- انتخاب پهنه مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی در سازندهای ایلام و سروک در یکی از چاه های نفتی میادین جنوب غربی ایران
مهران کلهری، سجاد قره جلو و سپیده یاسمی خیابانی ۲۳
- زیست چینه نگاری نهشته های کرتاسه براساس نانوفسیل های آهکی در برش کوهستان (شمال غرب کرمان، حوضه رسوبی ایران مرکزی)
مرغیه نطفی مقدم ۳۹
- زمین شیمی آرسنیک در محیط های آب، خاک و رسوب و ارتباط آن با تجمع زیستی در منطقه بردسیر، کمربند ارومیه - دختر
راحله هانفی، فرهاد اسدیان، زهرا بوسلیک و بتول جان جانه ۵۱
- کاربرد توموگرافی ژئوالکتریک در شناسایی تاثیر گسل ها بر هیدروژئولوژی آبخوان آبرفتی بادرود، جنوب شرق کاشان
حمیدرضا ناصری، فرشاد علی جانی، مرتضی درویش سدهی و فائزه فلسفی ۶۵
- ارزیابی ژئوشیمیایی پتانسیل هیدروکربن زایی سازند گورپی در حوضه خلیج فارس
صادق براتی بلناجی، ابراهیم سفیداری، هوشنگ مهرابی، سید محمد زمانزاده و محمد حسن توکل ۸۳

ISSN: 1735-7128
فصلنامه زمین شناسی
ISSN: 1735-7128

سال ۱۹، شماره ۷۴، تابستان ۱۴۰۴

Quarterly

Iranian Journal of Geology

Vol. 19, No. 74, Summer 2025

Contents

- Designing the optimal size of reserve estimation blocks based on different criteria (case study: Mouchesh Zarzima gold deposit)
Ahmadi, R. and Shahzamani, H. 105
- Selection of Appropriate Zones for Hydraulic Fracturing Operations in the Ilam and Sarvak Formations of an Oil Well in the Southwestern Oil Fields of Iran
Kalhori, M. , Gharchcheloo, S. and Yasemi Khiabani, S. 106
- Biostratigraphy of the Cretaceous deposits based on Calcareous nannofossils in northwest Kerman (Central Iran sedimentary basin)
Notghi Moghaddam, M. 107
- Geochemical Assessment of Arsenic in Water, Soil, and Sediment and Its its Bioaccumulation Relationship in Human Hair, Bardsir Area, Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt
hatefi, R., Asadian, F., Boosalik, Z. and Janjaneh, B. 108
- Hydrogeological and Hydrochemical Anomalies of Badrud Aquifer, Southeast Kashahn, with Emphasis on Geoelectrical Parameters
Naseri, H.R., Alijani, F., Darvish Sedehi, M. and Falsafi, F. 109
- Geochemical Evaluation Potential of the Gurpi Formation in the Northwest of the Persian Gulf
Barati Boldaji, S., Sfidari, E., Mehrabi, H., Zamanzadeh, S.M. and Tavakkol, M.H. 110



پژوهشکده علوم پایه کاربردی



سال ۱۹، شماره ۷۴، تابستان ۱۴۰۴

صاحب امتیاز:

پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

مدیر مسئول:

دکتر سعید میرزایی، استاد پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

سردبیر:

دکتر محمدحسین آدابی، استاد دانشگاه شهید بهشتی

همکار سردبیر:

دکتر حمیدرضا ناصری، استاد دانشگاه شهید بهشتی

هیئت تحریریه:

دکتر محمدحسین آدابی، استاد دانشگاه شهید بهشتی

دکتر حمیدرضا ناصری، استاد دانشگاه شهید بهشتی

دکتر محمد رضا رضایی، استاد دانشگاه کرتین استرالیا

دکتر عزت ا... رئیسی، استاد دانشگاه شیراز

دکتر عبد... 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 انستیتو نفت دانشکده فنی دانشگاه تهران

دکتر فرید مر، استاد دانشگاه شیراز

دکتر رضا موسوی حرمی، استاد دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر سعید میرزایی، استاد پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

دکتر منصور وثوقی عابدینی، دانشیار دانشگاه شهید بهشتی

دکتر کمال خدایی، دانشیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

دکتر اصغر کهن‌دل، دانشیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

مدیر داخلی: دکتر نسیم حیدریان دهکردی، استادیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

مدیر اجرایی: بتول جان‌جانه

ویراستارها: دکتر حمیدرضا ناصری و ناعمه فاضلی

صفحه‌آرا: آرزو انصاری

تاریخ انتشار: تابستان ۱۴۰۴

چاپ: توس

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

نشانی دفتر فصلنامه:

تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی، صندوق پستی: ۱۹۶۱۵۱۱۷۱

تلفن: ۲۲۴۳۱۹۳۹، ۴-۲۲۴۳۱۹۳۳

پست الکترونیک: IranianJournalofGeology@gmail.com

وب سایت فصلنامه: Geology.saminattech.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 دسترسی 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 Times New Roman ۱۱، در نرم‌افزار Word تایپ و تصاویر در فولدر جداگانه با فرمت Jpeg یا Tiff به نشانی IranianJournalofGeology@gmail.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 بلافاصله 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. به‌عنوان مثال:

بابایی، م. و حسینی، ی.، ۱۳۸۳. الگوی سیستم زهکشی در معادن. فصلنامه تحقیقات منابع آب، ۱۲، ۱۴-۲۷.

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 نویسندگان و سال انتشار منبع استفاده گردد.

- در متن مقاله از آوردن کلمات انگلیسی (به استثنای اسامی جنس و گونه فسیل‌ها و اسامی نویسندگان) 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.

طراحی اندازه و ابعاد بهینه بلوک‌های تخمین ذخیره بر اساس معیارهای مختلف (مورد مطالعه: کانسار طلای زرزیمای موجش)

رضا احمدی^(۱) و هانیه شاه‌زمانی^(۲)

۱. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

چکیده

انتخاب اندازه و ابعاد بهینه بلوک‌ها تأثیر بسزایی بر روی مدل بلوکی و در نتیجه دقت نتیجه‌های تخمین عیار و میزان ذخیره کانسارها می‌گذارد. در پژوهش حاضر، اندازه بهینه بلوک‌های تخمین به‌منظور مدل‌سازی بلوکی و ارزیابی ذخیره کانسار طلای زرزیمای موجش واقع در استان کردستان، تعیین شده است. برای دستیابی به هدف، علاوه بر معیارهای معمول همانند اندازه شبکه اکتشاف و میزان خطای تخمین، از پارامتر شاخص کیفی سنگ (RQD) نیز استفاده شد. با این رویکرد، اندازه بهینه هر بلوک اصلی 5×5 متر در جهت‌های افقی و دو متر در جهت قائم و برای زیربلوک‌ها $2/5 \times 2/5$ متر در جهت‌های افقی و یک متر در جهت قائم انتخاب شد. بر پایه واریوگرافی داده‌های تبدیل‌یافته عیارسنجی طلا، مدل‌های تئوری انطباق‌یافته بر تغییر نماهای تجربی از نوع کروی، گوسی و نمایی است و کانسار دارای ناهمسانگردی هندسی می‌باشد. برای تخمین متوسط عیار و ذخیره کانسار از روش‌های هندسی عکس مجذور فاصله و زمین‌آماري لاگ کریجینگ معمولی به کمک نرم‌افزار Datamine استفاده شد. استفاده از روش عکس مجذور فاصله همراه با روش لاگ کریجینگ معمولی، به‌منظور امکان‌پذیری ارزیابی صحت نتیجه‌های از طریق مقایسه نتیجه‌های تخمین می‌باشد. برای کنترل عیار در شرایط مختلف اقتصادی، متوسط عیار، میزان ذخیره و متوسط واریانس تخمین عیار کانسار به‌ازای عیاردهای ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر تن محاسبه شد. روند نمودارهای عیار-تناژ کانسار صحت انجام فرآیند را تایید می‌کند. همچنین مطابق انتظار، نتیجه‌های روش تخمین لاگ کریجینگ به دلیل ناریب بودن و خطای تخمین کمتر، از روش عکس مجذور فاصله دقیق‌تر و قابل اعتمادتر است.

واژه‌های کلیدی: زرزیمای موجش، شاخص کیفی سنگ (RQD)، اندازه بهینه بلوک، مدل‌سازی بلوکی، خطای تخمین، لاگ کریجینگ معمولی

مقدمه

یکی از مسائل مهم در ارتباط با اکتشاف و ارزیابی ذخایر اغلب کانسارهای فلزی، پیچیدگی‌های زمین‌شناسی، گسترش پراکنده ماده معدنی درون سنگ میزبان و همواره عیار بسیار پایین ماده معدنی است. تخمین ذخیره دقیق کانسارهای فلزی یکی از مهم‌ترین و بحرانی‌ترین مراحل طراحی و تصمیم‌گیری در مورد این نوع کانسارها به شمار می‌رود. شناخت کامل یک کانسار، مستلزم انجام یک سری عملیات پردازشی و مدل‌سازی است که این کار به دلیل پیچیدگی‌های موجود و طولانی، زمان‌بر بودن و مشکل بودن محاسبات مربوطه، همواره با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی، دقیق‌تر و سریع‌تر انجام می‌شود. مهم‌ترین کاربرد مدل‌سازی، تعیین پارامترهای لازم برای طراحی و برنامه‌ریزی تولید معدن است (عطایی‌پور، ۱۳۹۸). انواع زیادی از مدل‌ها وجود دارند که برای توصیف و نمایش ذخایر معدنی به کار رفته‌اند. انتخاب نوع مدل به عواملی همچون شکل و هندسه کانسار، پیچیدگی وضعیت زمین‌شناختی، نوع ماده معدنی، پذیرش کاربر و آشنایی وی با تکنیک‌های مختلف مدل‌سازی بستگی دارد.

به‌طورکلی روش‌های تخمین ذخیره کانسارها به دو گروه روش‌های کلاسیک (هندسی) و روش‌های زمین‌آماري تقسیم می‌شوند. روش‌های تخمین زمین‌آماري از دقیق‌ترین روش‌های تخمین ذخیره برای اغلب کانسارهای فلزی باارزش و کم‌عیار، به‌ویژه کانسارهای طلا و مس هستند (احمدی، ۱۳۹۹). اصول تمام روش‌های محاسبه ذخیره یکسان است و گام نخست تخمین ذخیره اغلب کانسارهای معدنی ساخت مدل بلوکی (بلوک‌بندی) کانسار می‌باشد. ساخت مدل بلوکی کانسار، بسیار مهم و حیاتی است زیرا میزان دقت این مرحله از فرآیند به‌طور مستقیم بر روی دقت نتیجه‌های تخمین ذخیره، تاثیر قابل‌توجهی می‌گذارد (Ahmadi and Ehsan-nejad, 2022). عوامل مختلفی همانند وضعیت زمین‌شناسی کانسار، اندازه و ابعاد شبکه اکتشاف، میزان سختی و مقاومت مکانیکی کانسنگ و میزان خطای تخمین، بر روی طراحی اندازه و ابعاد بهینه بلوک‌های تخمین تاثیرگذارند.

در ارتباط با تعیین اندازه و ابعاد بهینه بلوک‌ها به‌منظور بلوک‌بندی کانسارها و تخمین ذخیره زمین‌آماري کانسارها، طی سال‌های اخیر، تحقیقات معدود و انگشت‌شماری صورت گرفته که در ادامه به چند مورد از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود. بر اساس نظر جرنل و هوجبرت (Journel and Huijbregts, 1978) ابعاد بلوک‌ها باید کمتر از فواصل نمونه‌برداری باشد. این پژوهشگرها یک سوم تا نصف فاصله بین گمانه‌ها را برای ابعاد بلوک‌ها پیشنهاد کرده‌اند و اعتقاد دارند که انتخاب بلوک‌هایی با ابعاد کوچک‌تر، باعث هموارشدگی مصنوعی مدل می‌شود؛ چرا که به بلوک‌های کوچک همجوار، عیار یکسانی نسبت داده می‌شود و از سویی انتخاب بلوک‌های خیلی بزرگ نسبت به فواصل گمانه‌ها نیز باعث کاهش تفکیک‌پذیری مدل در جداسازی بلوک‌های کانسنگ و باطله می‌شود. دیوید (David, 1979) پیشنهاد کرده است که ابعاد بلوک‌ها نبایستی از یک چهارم فاصله بین گمانه‌ها کمتر باشد. مطابق نظر هالس (Hulse, 1992) انتخاب ابعاد بلوک برابر با یک چهارم فاصله نمونه‌ها زمانی مفید خواهد بود که طول دامنه تغییرنا کم‌وبیش ده برابر ابعاد بلوک‌ها باشد. وان و همکاران (Vann et al., 2003) اعتقاد دارند وقتی ابعاد بلوک‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌ای از نصف فواصل شبکه حفاری کوچک‌تر انتخاب شود، همواره نتیجه‌های قابل قبولی به دست نمی‌آید، مگر آنکه عیار، پیوستگی خیلی زیادی داشته باشد؛ یعنی مقدار اثر قطعه‌ای خیلی کم و دامنه تاثیر تغییرنا خیلی زیاد باشد. مدل‌سازی سه‌بعدی، بلوک‌بندی و تخمین ذخیره کانسار طلای شماره ۳ هیردا واقع در فاصله ۱۴۰ کیلومتری شهر بیرجند توسط عسکری و همکاران (۱۳۹۲) انجام شده است. در این مطالعه با توجه به نحوه گسترش ماده معدنی، پیوستگی کانسنگ و باطله، فاصله حفاریات و میزان متوسط ضخامت کانسنگ، ابعاد بلوک‌های تخمین برابر با $1 \times 1 \times 1$ متر انتخاب شده است. مطابق نظر رسی و داتچ (Rossi and Deutsch, 2014) ابعاد بلوک‌های تخمین با در نظر گرفتن فواصل گمانه‌ها

که در این رابطه σ_v^2 واریانس بلوکی، σ_k^2 واریانس کریجینگ و KE بازدهی کریجینگ می‌باشد. زکی و همکاران (Zaki et al., 2022) برای تخمین داده‌های بسیار اریب کانسار طلای رگه‌ای کوارتزریچ^۷ واقع در پنج کیلومتری شرق معدن طلای سوکاری^۸ از پنج الگوریتم یادگیری ماشین شامل رگرسیون فرآیند گاوسی^۹ (GPR)، رگرسیون بردار پشتیبان^{۱۰} (SVR)، مجموعه درخت تصمیم^{۱۱} (DTE)، شبکه عصبی به‌طور کامل متصل^{۱۲} (FCNN) و K نزدیک‌ترین همسایه^{۱۳} (KNN) استفاده کردند. آن‌ها مدل سازی بلوکی را بر اساس هندسه زمین‌شناسی، راهکار بهره‌برداری و فاصله بین گمانه‌ها انجام داده و ترکیب‌بندی بلوک مادر را $20 \times 20 \times 5$ متر و حداقل اندازه بلوک را $5 \times 5 \times 1/25$ متر انتخاب کردند که بلوک مادر دامنه کانی‌سازی تفسیر شده را پوشش می‌دهد و از بلوک فرعی برای تضمین مناسب بودن نمایش حجم استفاده شده است.

در پژوهش حاضر ابتدا طراحی و تعیین ابعاد بهینه بلوک‌های کانسار طلای زرزیمای موجش به کمک تلفیق تمام اطلاعات اکتشافی موجود به‌ویژه شبکه اکتشاف از پیش طراحی شده و نتیجه‌های مدل‌سازی سه‌بعدی ویژگی مکانیکی کانسنگ^{۱۴} (RQD) صورت گرفته است. سپس مدل‌سازی بلوکی و تخمین ذخیره کانسار با استفاده از روش‌های زمین‌آماري کریجینگ و هندسی عکس مجذور فاصله براساس میزان خطای تخمین حاصل، انجام گرفته تا با افزایش دقت تخمین، نتیجه‌های تخمین به واقعیت نزدیک‌تر شود.

و سایر ملاحظات مهندسی حتی ممکن است از واحدهای معدنکاری انتخابی^۱ (SMU) بزرگ‌تر باشند. به‌طور کلی تخمین عیار بلوک‌های بزرگ نسبت به بلوک‌های کوچک، آسان‌تر و عیار تخمینی آن‌ها به عیار واقعی نزدیک‌تر است، اما انتخاب ابعاد خیلی بزرگ برای بلوک‌ها نیز در کار برنامه‌ریزی معدنی، مسئله‌ساز خواهد بود. چاندرمن و همکاران (Chanderman et al., 2017) اندازه بهینه بلوک کانسار طلا در کشور مالی را $25 \times 25 \times 10$ متر انتخاب کردند. برای بهینه‌سازی تعداد کامپوزیت‌ها، از فواصل نمونه‌های نظری با فاصله نزدیک $25 \times 25 \times 7$ متر همراه با گسسته‌سازی $5 \times 5 \times 5$ متر استفاده شده است. برای بهینه‌سازی اندازه بلوک، بیشینه و کمینه تعداد نمونه بهینه برای پهنه‌های کانی‌سازی، براساس سعی و خطا تعیین شده است. برای بهینه‌سازی شعاع جستجو، فواصل بزرگ بین نمونه‌ها به‌طور نظری $25 \times 25 \times 10$ متر، گسسته‌سازی $5 \times 5 \times 5$ متر همراه با اندازه بلوک بهینه شده در نظر گرفته شده است. عزمی و همکاران (Azmi et al., 2020) برای مدل‌سازی بلوکی کانسار طلای دامن‌قر^۲ واقع در شمال شرق ایران از سه روش عکس فاصله وزن‌دار^۳ (IDW)، کریجینگ معمولی^۴ (OK) و کریجینگ شاخص کامل^۵ (FIK) استفاده کردند. بر اساس مدل هندسی، نوع کانی‌سازی و طول نمونه‌ها برای ساخت مدل بلوکی کانسار، کمترین و بیشترین اندازه سلول‌ها به ترتیب برابر با $1 \times 1 \times 1$ و $2 \times 2 \times 2$ متر انتخاب شده است. در مجموع تعداد 86489 سلول به ترتیب با کمترین و بیشترین حجم برابر با یک و هشت متر مکعب و حجم کلی بلوک‌های برابر با 381643 متر مکعب بوده که نتیجه‌های تخمین هر سه روش یکسان است. به‌منظور تعیین ابعاد بهینه بلوک‌های کانسار مس علی‌آباد یزد توسط احمدی و احسان‌نژاد (Ahmadi and Ehsan-nejad, 2022)، از معیارهای بازدهی کریجینگ^۶ (Krige, 1996) با تعریفی مطابق رابطه (۱) و واریانس کریجینگ استفاده شد.

$$KE (\%) = \frac{\sigma_v^2 - \sigma_k^2}{\sigma_v^2} \times 100 \quad (1)$$

1. Selection mining unit
2. Damanghor
3. Inverse Distance Weighting
4. Ordinary Kriging
5. Fully Indicator Kriging
6. Kriging efficiency
7. Quartz Ridge
8. Sukari
9. Gaussian Process Regression
10. Support Vector Regression
11. Decision Tree Ensemble
12. Fully Connected Neural Network
13. K-Nearest Neighbors
14. Rock Quality Designation

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی گستره

کانسار طلای زرزیم در بخش جنوبی استان کردستان، در فاصله تقریبی ۵۰ کیلومتری جنوب شهر سنندج، ۵۰ کیلومتری شهر کامیاران و چهار کیلومتری شهر موچش واقع شده است. پهنه مورد مطالعه در حد فاصل $47^{\circ} 4'$ تا $47^{\circ} 7'$ طول شرقی و $35^{\circ} 2'$ تا $35^{\circ} 4'$ عرض شمالی قرار دارد. این گستره بر روی پهنه تکتونیکی سنندج-سیرجان، چهارگوش زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ سنندج و برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سنندج قرار دارد.

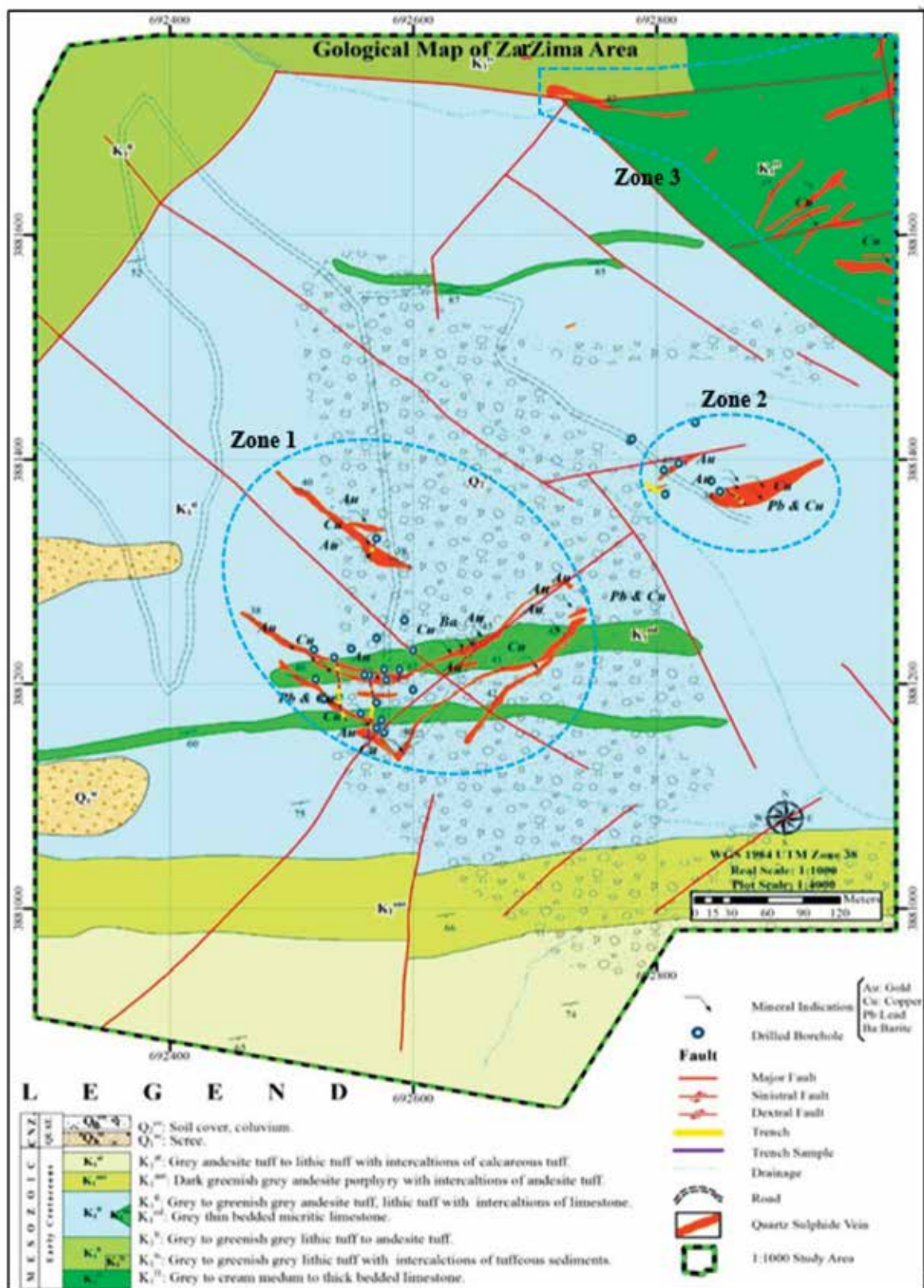
گستره، اغلب شامل ارتفاعات می‌باشد و دشت‌ها در آن جایگاهی ندارند؛ ولی روی رخنمون‌های سنگی در بالای ارتفاعات توسط قشر نازک خاک پوشیده شده است. واحدهای سنگی گستره شامل تناوب سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی است. واحدهای رسوبی شامل سنگ‌آهک خاکستری است که چند متر ضخامت دارد و به‌صورت یک افق در دریای کم‌عمق نهشته شده است. واحدهای آتشفشانی و آذرآواری به‌صورت بین‌لایه‌ای با واحدهای رسوبی و با ترکیب غالب آندزیتی دیده می‌شوند. قدیمی‌ترین واحد گستره شامل سنگ‌آهک متوسط تا ضخیم‌لایه چین‌خورده‌ای است که به‌ندرت دارای میان‌لایه‌هایی از آهک ماسه‌ای است. واحد توف آندزیتی لیتیک، توف خاکستری تا خاکستری مایل به سبز با میان‌لایه‌های سنگ‌آهک، مهم‌ترین واحد سنگی گستره از نظر کانه‌زایی است. به نظر می‌رسد که سنگ‌آهک نقش مؤثری در تشکیل کانی‌سازی داشته باشد. حضور افق‌های کربناتی در محل‌های دارای رگه کوارتز سولفیدی کانه‌دار نشانگر اهمیت این واحد است. افق‌های کربناتی به‌صورت بین‌لایه‌ای در بخش‌های مختلفی از این افق دیده می‌شوند (کاظمی مهرنیا، ۱۳۹۹).

از نظر ساختاری منطقه مورد مطالعه بر اساس شواهد با حضور گسل‌های معکوس، رانده و رورانده فراوان مشخص شده است. چین‌خوردگی‌های فراوان همراه با گسلش از نوع رانده‌گی، از مشخصات این گستره می‌باشد. از نگاه زمین‌شناسی اقتصادی حضور رگه‌های سیلیسی در پهنه مطالعاتی حائز اهمیت است. این رگه‌ها در سنگ‌های ولکانیکی و همچنین آهک‌ها دیده می‌شوند. در این رگه‌ها

کانه‌هایی از قبیل مالاکیت به‌صورت آغشتگی، پیریت و کالکوپیریت به‌صورت افشان و به‌صورت محدودتر، گالن حضور دارند. همچنین اکسیدهای آهن نیز به‌صورت آغشتگی دیده می‌شوند. در مواردی هم رگه‌های کانه‌دار همراه با باریت و کلسیت هستند. رگه‌های سیلیسی گستره دو روند را نشان می‌دهند، یکی شمال‌شرقی-جنوب‌غربی و دیگری کم‌وبیش شرقی-غربی که تا حدودی با روند گسل‌ها همخوانی دارند و شاید یکی از عوامل اصلی کنترل‌کننده آن‌ها گسل‌ها هستند. بنابراین، فرآیند گسلش در گستره سهم بسزایی در تشکیل رگه‌های سیلیسی داشته است. وجود بافت‌هایی از قبیل بافت شانه‌ای در سیلیس‌ها و بافت پرکننده فضاهای خالی نشان از تشکیل این رگه‌ها در عمق و فشار کم می‌باشد (کاظمی مهرنیا، ۱۳۹۹). کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه در پیکره رگه‌های سیلیسی رخ داده است. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی-معدنی کانسار طلای زرزیم را همراه با نمایش رگه‌های سیلیسی در سه پهنه اصلی نشان می‌دهد. براساس مشاهدات صحرایی و اطلاعات موجود از کانسار زرزیم مطابق جدول ۱، می‌توان تیپ این کانسار را طلای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین در نظر گرفت. سنگ میزبان ولکانیک دگرگون شده همراه با سنگ‌آهک دوباره تبلور یافته، بافت و ساخت رگه‌های سیلیسی و ویژگی‌های ژئوشیمیایی حاکی از همراهی طلا با مس، سرب، روی، نقره و کادمیوم، همگی شواهدی از کانسارهای طلای اپی‌ترمال ارائه می‌کند (کاظمی مهرنیا، ۱۳۹۹).

تحلیل اکتشافی گستره

سطح گستره کانسار براساس شرایط زمین‌شناسی، وضعیت رخنمون و حضور ماده معدنی، نوع و تعداد فعالیت‌های اکتشافی انجام شده مطابق شکل ۱ به سه پهنه دارای پتانسیل معدنی به نام پهنه‌های ۱ تا ۳ نام‌گذاری شده است. در این سه پهنه تعداد ۲۸ رگه سیلیسی کانه‌دار شناسایی شده که این رگه‌ها اغلب روند شمال‌شرقی-جنوب‌غربی دارند و ضخامت آن‌ها از یک تا ۱۰ متر متغیر است. به‌منظور بررسی وضعیت و گسترش کانی‌سازی طلا در سطح و اعماق، فعالیت‌های اکتشافی سطحی و عمقی گسترده‌ای در کل کانسار صورت گرفته است. در این راستا تعداد ۴۳



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی-معدنی کانسار طلای زرزیما با نمایش رگه‌های سیلیسی در سه پهنه اصلی به صورت گستره‌های خطچین آبی‌رنگ (ویرایش شده از کاظمی مهرنیا، ۱۳۹۹)

نمونه لیتوژئوشیمیایی از سطح کل کانسار (پهنه‌های ۱، ۲ و ۳) برداشت شده است. تعداد ۱۱ رشته ترانشه اکتشافی نیز در راستای عمود بر امتداد عمومی کانی‌سازی (کم‌وبیش شمال غربی-جنوب شرقی) و با فواصل متغیر ایجاد شده که از این تعداد، هشت رشته ترانشه در پهنه ۱ و سه رشته در پهنه ۲ ایجاد شده است. از رخساره‌های سنگی کانه‌دار هر ترانشه با روش لب‌پری پیوسته در مجموع ۵۹ نمونه و از دیواره‌های سنگی ترانشه‌ها تعداد ۲۱ نمونه شیاری (کانالی) با وزن بیش از دو کیلوگرم برداشت شده است. همچنین به منظور بررسی وضعیت کانی‌سازی طلا در اعماق، تعداد ۲۱ حلقه گمانه اکتشافی با طول کلی ۱۰۱۲/۵ متر در پهنه ۱ و تعداد نه حلقه گمانه با طول کلی ۴۶۸/۵ متر در پهنه ۲ با یک شبکه اکتشافی تا حدودی منظم ۲۵×۲۵ متری حفاری شده است. از این تعداد، ۱۴ حلقه گمانه به‌طور قائم و ۱۶ حلقه نیز به‌طور مایل (آزموتی) حفاری شده که کوتاه‌ترین و بلندترین آن‌ها به‌ترتیب BH11 با طول ۱۸ متر و BH31 با طول ۸۶ متر هستند. مغزه‌های حاصل از حفر گمانه‌های اکتشافی از مدل HQ و قطر آن‌ها ۶۵ میلی‌متر است. تعداد ۱۲۵ نمونه مغزه‌ای از گمانه‌های پهنه ۱ و تعداد ۲۲ نمونه از گمانه‌های پهنه ۲ برداشت شده و همه نمونه‌های مغزه‌ای حاصل از حفر گمانه‌ها با روش Fire Assay برای عنصر طلا (برحسب ppb) و ICP-OES برای یک بسته ۲۶ عنصری از جمله مس، نقره، آرسنیک، روی، سرب، مولیبدن و آنتیموان (برحسب ppm) مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند.

جدول ۱. مقایسه ویژگی‌های مدل توصیفی کانسارهای طلای تیپ ایی ترمال سولفیداسیون پایین و زرزیمای موش (ویرایش شده از کاظمی مهرنیا، ۱۳۹۹)

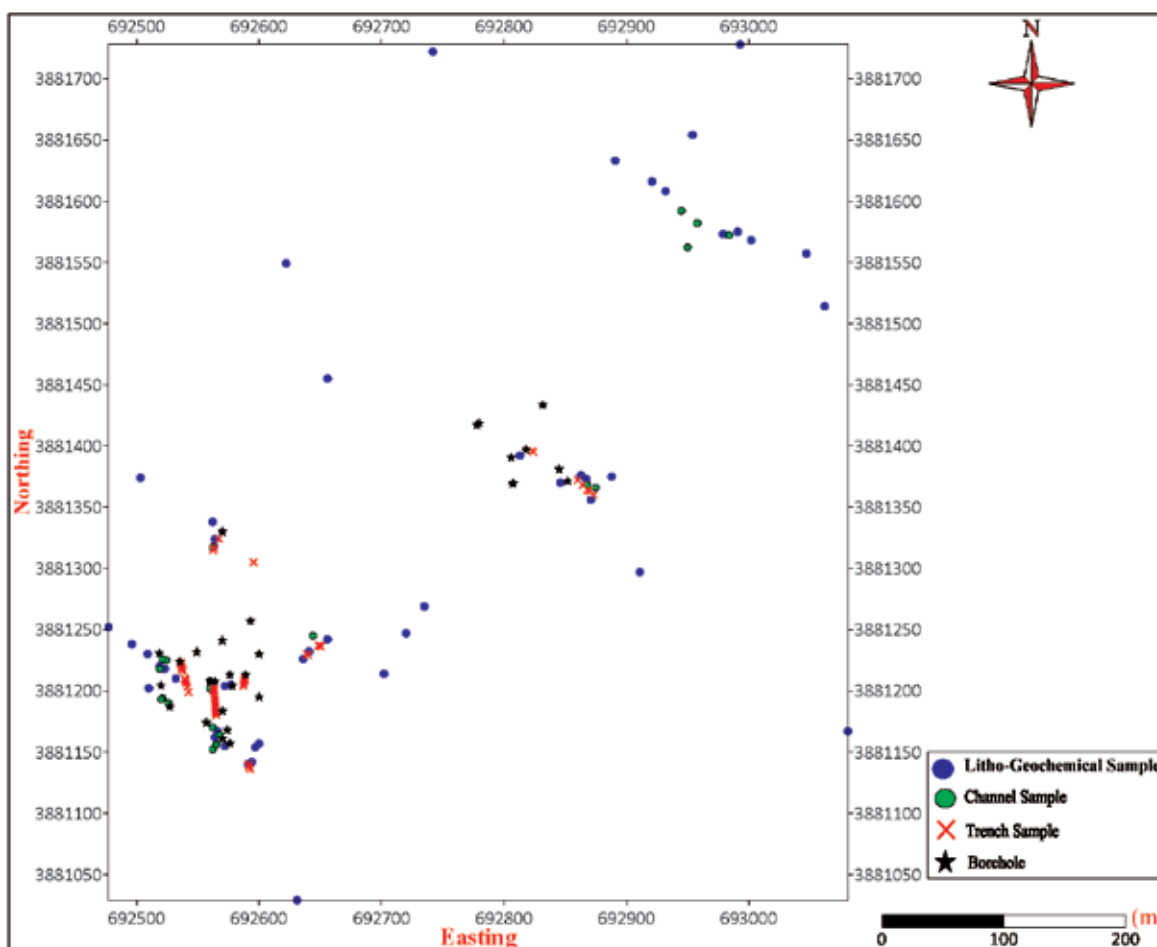
ویژگی‌ها	توصیف	گستره زرزیم
سنگ میزبان	بازالت، آندزیت، ریولیت پورفیری، همراه با سنگ‌های آتشفشانی بایمدال بازالتی-ریولیتی	آندزیت با بین لایه‌های سنگ‌آهک
ارتباط با سنگ‌های نفوذی	حضور توده‌های نفوذی، سیل، دایک‌های کالک‌آلکان تا شوشونیتی	توده‌های گرانودیوریت، دیوریت تا کوارتز مونوپهنه‌یت در فاصله دو کیلومتری گستره برونزد دارند.
ساختارها	گسل پرشیب، پهنه‌های کششی پهنه فرورانس و ریف‌های پس از برخورد	گسلش اصلی پهنه از نوع گسل‌های معکوس پرشیب است.
پاراژنز	الکتروم، نقره آزاد، آرژانتیت، پیریت، کالکوپیریت، پیرویت، آرسنوپیریت، پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، اسفالریت، گالن، کانی‌های سلنید و تلورید (نادر)، کائولینیت، کلریت، کوارتز کراستیفرم، کالسدونی، کلسیت تیغه‌ای، آدولاریا، سریسیت، باریت و فلوریت	پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، اسفالریت، گالن، کانی‌های سلنید و تلورید (نادر)، کائولینیت، کلریت، کوارتز کراستیفرم، کالسدونی، کلسیت تیغه‌ای، باریت و فلوریت
ساخت و بافت کانسنگ	نواری، کراستیفرم، کلوفر، پرکننده فضای خالی و شانه‌ای	نواری، کراستیفرم، کلوفر، پرکننده فضای خالی و شانه‌ای
عناصر همراه	جیوه، آرسنیک، نقره، سلنیوم، تلوریوم و آنتیموان	مس، سرب، روی، آرسنیک
دگرسانی	سیلیسی‌شدن (کوارتز، کالسدونی)، مجموعه سریسیت-ایلیت-کائولینیت، آرژلیک‌حدواسط (کائولینیت-ایلیت-مونت‌موریونیت) و پروپیلیتیک (اپیدوت، کلسیت و کلریت)	سیلیسی‌شدن، آرژلیک‌حدواسط (کائولینیت-ایلیت-مونت‌موریونیت) و پروپیلیتیک (اپیدوت، کلسیت و کلریت)
شکل هندسی	کانی‌سازی طلای رگه‌ای کوچک، استوک‌ورک و پراکنده	کانی‌سازی طلای رگه‌ای کوچک، استوک‌ورک و پراکنده
گستره سنی	سنوزوئیک و به‌ندرت ژوراسیک و پالئوزوئیک	سنگ میزبان کرتاسه است.
ویژگی‌های ژئوفیزیکی	پلاریزاسیون القایی (IP) برای تعیین پهنه‌های سولفیدی همراه با طلا در عمق، مغناطیس‌سنجی برای تعیین توده‌های آذرین نفوذی و پهنه‌های دگرسانی اکسید آهن در عمق	مطالعات ژئوالکتریک (IP-Rs) به‌خوبی کاربرد دارد.
ویژگی‌های ژئوشیمیایی	مقادیر بالای Ag, As, Au, Cu, Sb, Hg, Zn, Pb, Ba, F و Mn در سنگ و به‌طور محلی Te, Se, Hg	مقادیر بالای Au, Cu, Sb, Zn, Pb, Ba و Mn
محیط ژئودینامیکی	فرورانش با زاویه کم و حرارت ناشی از فعالیت‌های گرمایی و ساختارهای کششی	کمان ماگمایی

ادامه جدول ۱.

ویژگی‌ها	توصیف	گستره زرزیم
کانسارهای مرتبط	طلا- نقره چشمه آب گرم، ماسیوسولفید کروکو	کانسارهای آهن اسکارنی
عیار	کم‌وبیش بین یک تا چهار گرم در تن	عیار متوسط یک گرم در تن ولی عیارها به طور محلی بالاست.
عمق تشکیل	کمتر از یک کیلومتر	نامشخص
میزان ذخیره	کم‌وبیش تناژ بالا، بیش از ۱۰۰ تن طلای خالص	برآورد ذخیره حدود یک تن فلز محتوی
نمونه ایران و جهان	قلعه‌زری، کانسارهای چالو، دارستان و آستانه (ترود-چاه‌شیرین) McLaughlin (California), Hishikari (Japan), Pajingo (Australia)	

شکل ۲. نقشه موقعیت پراکندگی تمام کارهای اکتشافی سطحی و گمانه‌های اکتشافی را در سطح گستره کانسار طلای زرزیم نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، برداشت این تعداد کار اکتشافی با تراکم به نسبت زیاد در یک سطح گستره با مساحت نه چندان زیاد، قابل قبول است.

مشخصات آماری گمانه‌های اکتشافی حفرشده در کانسار طلای زرزیم به تفکیک پهنه‌ها و نیز در سطح کل کانسار در جدول ۲ خلاصه شده است. با توجه به داده‌های این جدول مشاهده می‌شود که میزان بیشینه، دامنه تغییرات و میانگین عیار طلای گمانه‌های اکتشافی در پهنه ۲ از پهنه ۱ بسیار بیشتر است. درحالی‌که تعداد نمونه‌های برداشت و آنالیزشده گمانه‌های پهنه ۱ از پهنه ۲ خیلی بیشتر است.



شکل ۲. نقشه موقعیت پراکندگی تمام کارهای اکتشافی سطحی و گمانه‌ها در سطح گستره کانسار طلای زرزیم

جدول ۲. پارامترهای آماری داده‌های عیارسنجی طلای گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیمای موجش

پارامتر گستره	تعداد نمونه	کمینه (ppb)	بیشینه (ppb)	دامنه تغییرات (ppb)	میانگین (ppb)	میانه (ppb)	مد (ppb)	انحراف معیار (ppb)	ضریب تغییرات (%)	چولگی	کشیدگی
پهنه ۱	۱۲۵	۷	۷۱۰۷	۷۱۰۰	۵۷۸/۳۴	۱۴۵/۸۳	۲۳	۱۰۶۵/۱۶	۱۸۴/۱۸	۳/۴۴	۱۴/۴۳
پهنه ۲	۲۲	۵	۳۰۱۶۵	۳۰۱۶۰	۲۸۶۲	۴۵۴	-	۶۶۴۱/۱۷	۲۳۲/۰۵	۳/۶۹	۱۴/۷۹
سطح کل کانسار	۱۴۷	۵	۳۰۱۶۵	۳۰۱۶۰	۹۲۰/۱۱	۱۵۴/۳۱	۲۳	۲۸۲۴/۱۳	۳۰۶/۹۳	۸/۱۸	۸۰/۴۱

میزان شعاع هر استوانه نشان‌دهنده بزرگی مقدار عیار در طول مغزه مربوطه در گمانه است. مطابق این شکل تغییرات عیار پهنه مورد مطالعه با کمترین مقدار صفر و بیشترین مقدار حدود (ppb) ۳۱۰۰۰ به ۳۱ بخش رنگی با رنگ‌های مختلف تقسیم شده است. در این شکل بیشینه عیار ماده معدنی در اعماق، مربوط به گمانه‌های اکتشافی BH17 و BH46 می‌باشد که این دو گمانه با فاصله اندک در مجاورت یکدیگر و در راستای قائم حفر شده‌اند. در برخی از گمانه‌ها (همانند BH4، BH8، BH22، BH36 و BH40) نیز از سطح زمین تا اعماق، هیچ‌گونه ماده معدنی مشاهده نمی‌شود.

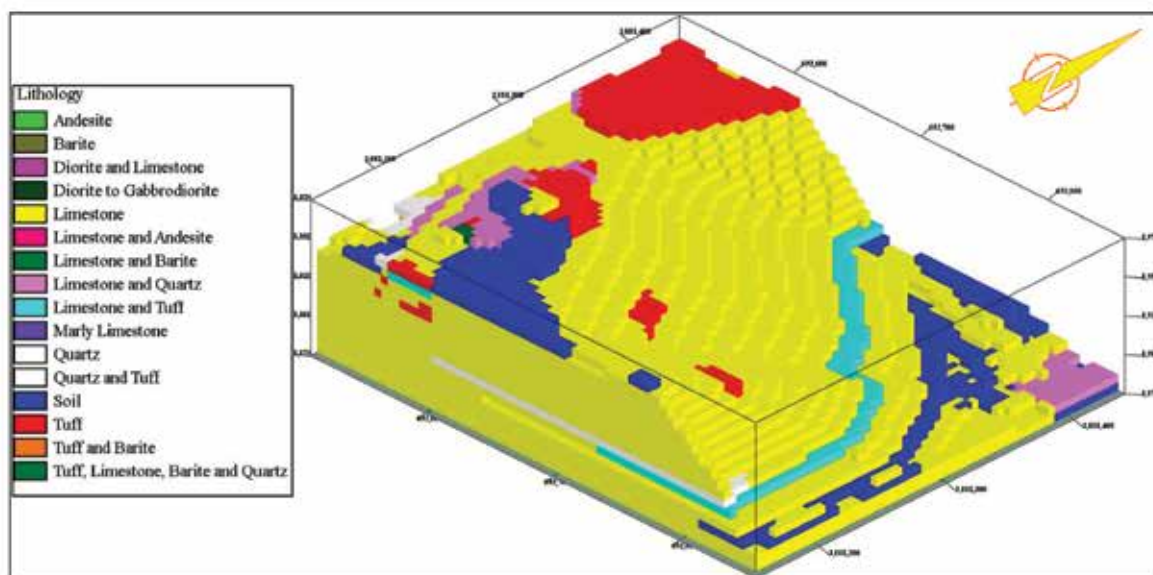
مدل سازی پارامتر شاخص کیفی سنگ

از جمله پارامترهای مهم و موثر بر طراحی و تعیین اندازه و ابعاد بلوک‌های استخراجی معدن، میزان سختی و مقاومت سنگ دربرگیرنده ماده معدنی است. مهم‌ترین ویژگی مکانیکی قابل اندازه‌گیری سنگ در این خصوص، پارامتر شاخص کیفی سنگ (RQD) است که به کمک مغزه‌های حاصل از حفر گمانه‌های اکتشافی براساس ران‌های حفاری (فواصل عمقی متناظر با طول محفظه مغزه‌گیر^۲) محاسبه می‌شود. پارامتر RQD عبارت از نسبت مجموع طول مغزه‌های بزرگ‌تر و یا مساوی ۱۰ سانتی‌متر (چهار اینچ) به طول کل هر دور حفاری^۳ است که همواره برحسب درصد بیان می‌شود. RQD معیار و نشانه‌ای از کیفیت سختی سنگ می‌باشد (Akingboye, 2023; Lukić and Zlatanović, 2017; Pells et al., 2016;

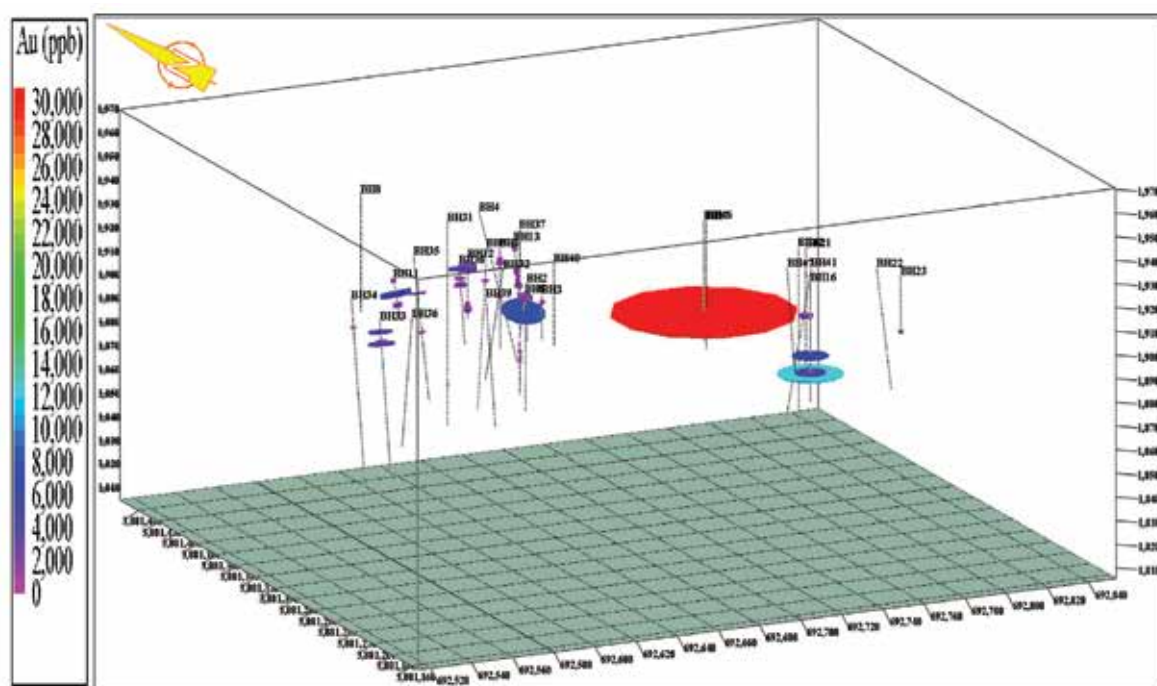
براساس مطالعات چشمی مغزه‌ها، مشخصات زمین‌شناسی شامل کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی، دگرسانی‌ها، رنگ ظاهری و غیره و نیز با استفاده از داده‌های عیارسنجی حاصل از تجزیه شیمیایی مغزه‌ها، ابتدا به کمک نرم‌افزار Rockworks از طریق رسم چاه‌نگار^۱ سه‌بعدی عیارسنجی گمانه‌ها و مدل سه‌بعدی لیتولوژی شناخت کاملی از کانسار طلای زرزیمای موجش صورت گرفته است. در شکل ۳ مدل سه‌بعدی سنگ‌شناسی گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیمای نشان داده شده است. در این شکل‌ها واحد اندازه‌گیری اعداد محورهای افقی و قائم، متر می‌باشد. براساس راهنمای رنگی این شکل، تنوع سنگ‌شناسی در گستره به نسبت زیاد است، به گونه‌ای که تعداد ۱۵ واحد لیتولوژی قابل تشخیص است. مطابق این شکل سنگ‌آهک، توف، آندزیت، دیوریت، سنگ‌آهک مارنی، سیلیس و باریت عمده‌ترین واحدهای سنگی تشکیل‌دهنده گستره می‌باشند. به‌طور کلی واحدهای سنگی سنگ‌آهک، توف‌ها و سیلیس در سطح گستره، بیشتر به چشم می‌خورند. برای ساخت مدل سه‌بعدی سنگ‌شناسی به‌منظور طرح اختلاط لیتولوژی، از الگوریتم اختلاط تصادفی به‌همراه درون‌یابی مقادیر خارج از گستره با سلول‌هایی به ابعاد ۵×۵×۵ متر استفاده شده است. این الگوریتم مدل‌سازی سنگ‌شناسی خاص، از پایه برای پرکردن فضای خالی بین چاه‌نگارها استفاده می‌شود. درون‌یابی مقادیر خارج از گستره نیز همانند عملیات برون‌یابی است که منجر به درون‌یابی کامل و به‌نقشه درآمدن تمام گستره به‌ویژه حاشیه‌ها می‌شود (Tutorial-RockWare).

شکل ۴ نمایش سه‌بعدی چاه‌نگار عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی کل کانسار طلای زرزیمای می‌باشد. در این شکل

1. Strip-log
2. Boring Cylinder
3. Drill run



شکل ۳. مدل سه‌بعدی سنگ‌شناسی گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیمای موش (واحد اندازه‌گیری اعداد محورهای افقی و قائم، متر می‌باشد)



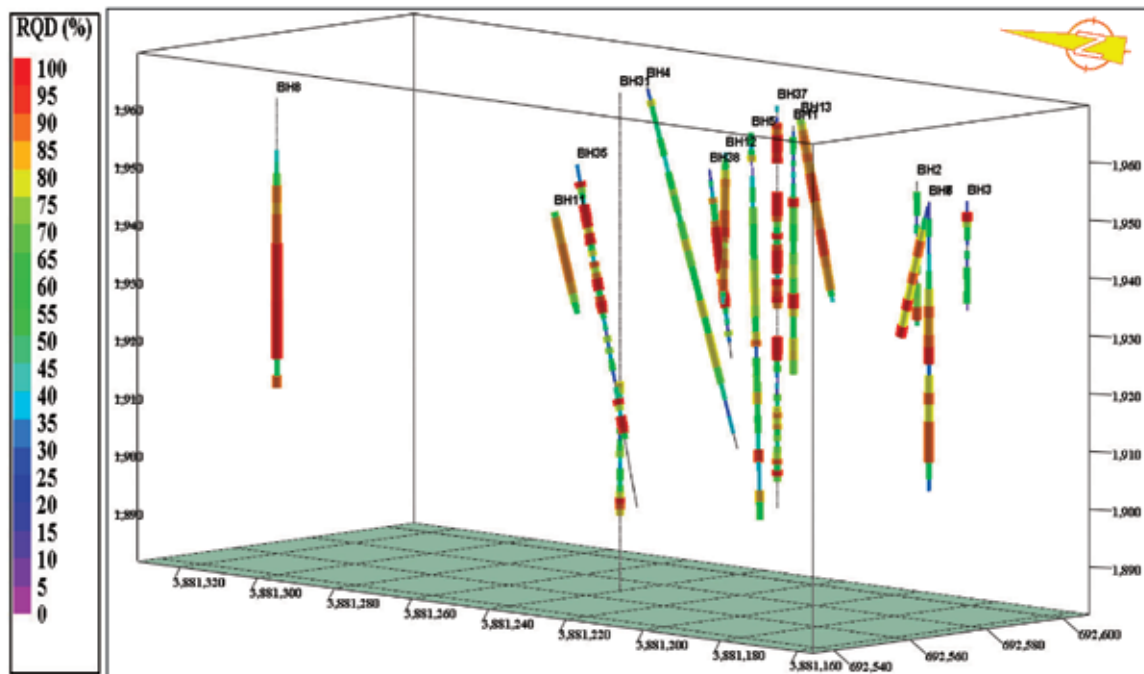
شکل ۴. نمایش سه بعدی چاه‌نگار عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی کل کانسار طلای زرزیمای موش

مغزه‌های حاصل از حفاری گمانه‌ها نشان می‌دهد. شکل ۶ نیز نقشه سه‌بعدی آماری داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیمای را نشان می‌دهد. برای رسم این نقشه، ابتدا مقدار میانگین RQD هر گمانه به موقعیت دهانه آن گمانه نسبت داده شد، سپس شبکه‌بندی صورت گرفت و با استفاده از الگوریتم عکس مجذور فاصله، درون‌یابی انجام

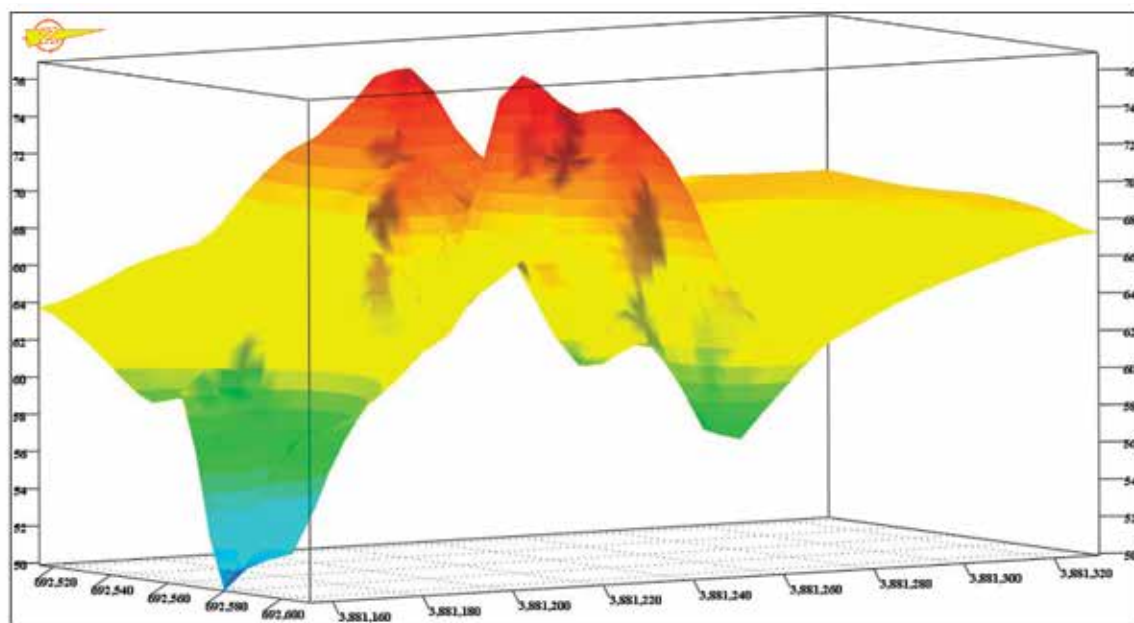
Hencher, 2015; Jaeger et al., 2007; Carter, 1992; Goodman, 1991; Bieniawski, 1989; Deere, 1989, 1963 و با روش‌های مختلفی تعیین می‌شود (Xu et al., 2023).

شکل ۵ چاه‌نگار سه‌بعدی تغییرات عمقی مقادیر RQD گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیمای را با استفاده از

طراحی اندازه و ابعاد بهینه بلوک‌های تخمین ذخیره بر اساس معیارهای مختلف ...



شکل ۵. نمایش سه‌بعدی چاه‌نگار RQD گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیمای موجش



شکل ۶. نقشه سه‌بعدی آماری داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیمای موجش

شکل مشاهده می‌شود که متوسط مقادیر RQD سنگ‌های کانسار در بخش میانی گستره، بالای ۷۰ درصد (زیاد) و در بخش مرکزی نیمه شمالی و نیز جنوب گستره، زیر ۶۰ درصد (متوسط) است.

شد. ترکیب رنگ‌بندی هم بدین صورت است که به کمترین مقدار RQD رنگ آبی تیره، به مقدار متوسط، رنگ زرد و به بیشترین مقدار، رنگ قرمز تخصیص داده شده و در فاصله بین آن‌ها ترکیب رنگی به‌طور خودکار از رنگ‌های سرد^۱ به گرم^۲ تغییر می‌کند. به‌منظور دید بهتر، در راستای قائم ۳/۵ برابر بزرگ‌نمایی صورت گرفته است. با توجه به این

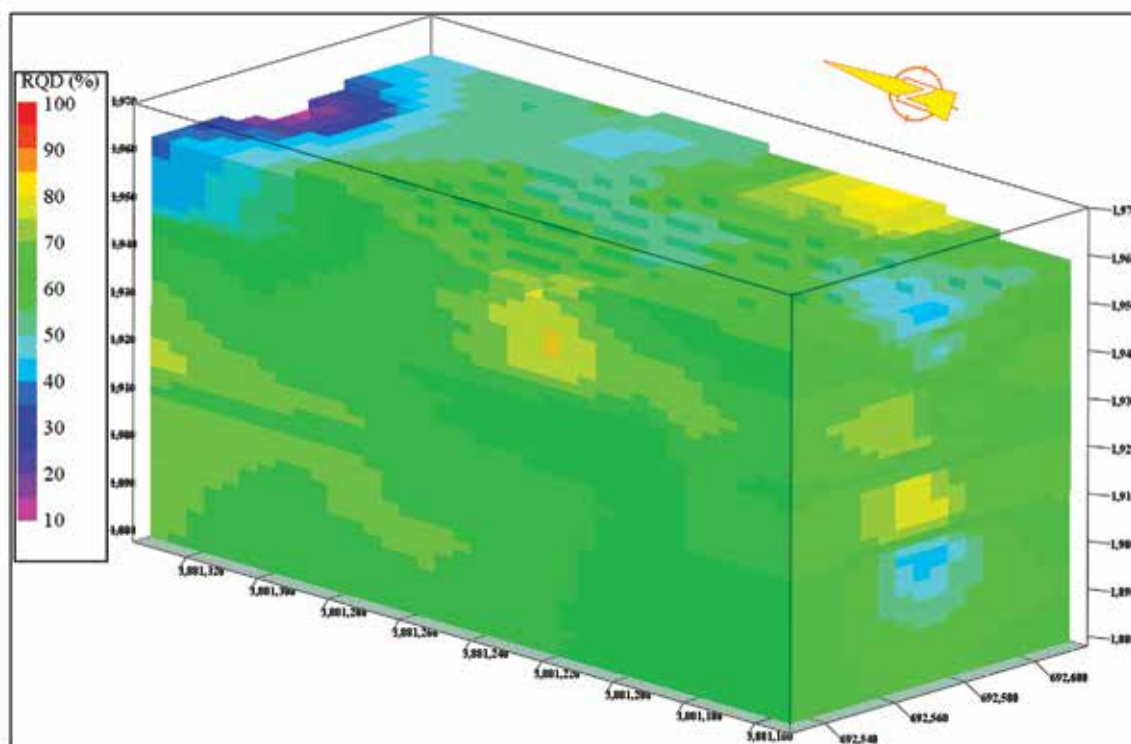
1. Cold
2. Hot

مختلف تقسیم شده است. مطابق این شکل سختی سنگ در بخش بزرگی از گستره، به نسبت زیاد (بین ۵۰ تا ۷۵ درصد) و در بخش کوچکی از شمال گستره بسیار کم است.

پردازش آماری اولیه داده‌های عیارسنجی

به منظور بررسی ویژگی‌های آماری و تعیین نحوه توزیع داده‌های عیارسنجی طلای گمانه‌های اکتشافی و کارهای اکتشافی سطحی، تجزیه و تحلیل آماری روی این متغیر صورت گرفت. در شکل ۸ نمودار فراوانی‌نما و توزیع احتمال تجمعی داده‌های خام و تبدیل‌یافته عیارسنجی طلا در کل کانسار نشان داده شده است. مطابق این شکل توزیع داده‌های عیارسنجی طلا در کل کانسار از نوع نرمال نیست بلکه از نوع لاگ نرمال می‌باشد.

در شکل ۷ مدل سه‌بعدی داده‌های RQD کانسار طلای زرزیما نشان داده شده است. برای ساخت این مدل نیز از یک مدل شبکه‌ای مکعب مستطیلی شکل به ابعاد $88 \times 175 \times 75$ متر با سلول‌های $2 \times 5 \times 5$ متری و داده‌های RQD نمونه‌های حفاری گمانه‌های اکتشافی، به کمک الگوریتم عکس فاصله وزن‌دار پیشرفته استفاده شده است. در این شکل برای دید بهتر، ارتفاع گمانه‌ها تا $3/5$ برابر بزرگ‌نمایی شده است. بیشترین تعداد داده‌های شرکت‌کننده در تخمین هر نقطه بر اساس سعی و خطا، در هر سلول ۲۰ عدد و در داخل گمانه، یک عدد انتخاب شد. راهنمای رنگی این شکل تغییرات میزان RQD در گستره را برحسب درصد نشان می‌دهد. مطابق این شکل تغییرات RQD منطقه مورد مطالعه با کمترین مقدار ۱۰ و بیشترین مقدار ۱۰۰ درصد به ۱۸ گستره رنگی با رنگ‌های

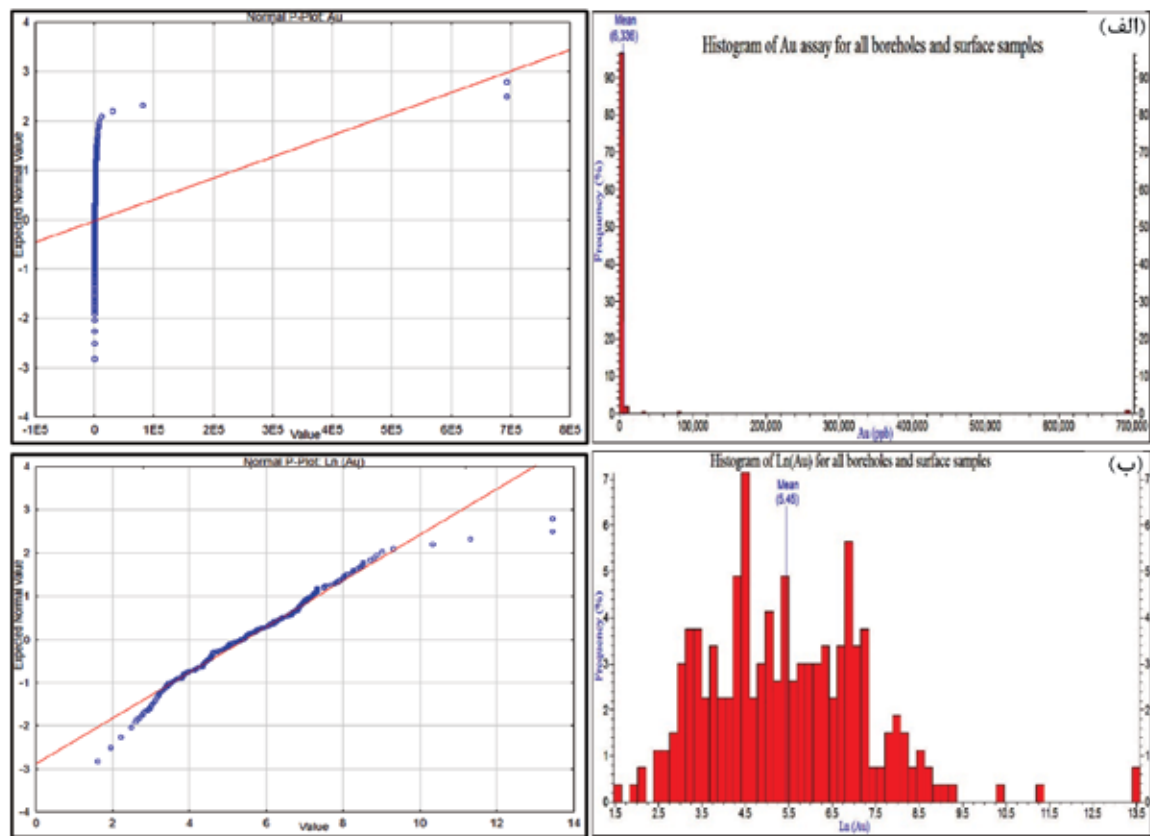


شکل ۷. مدل سه‌بعدی داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیماي موجش

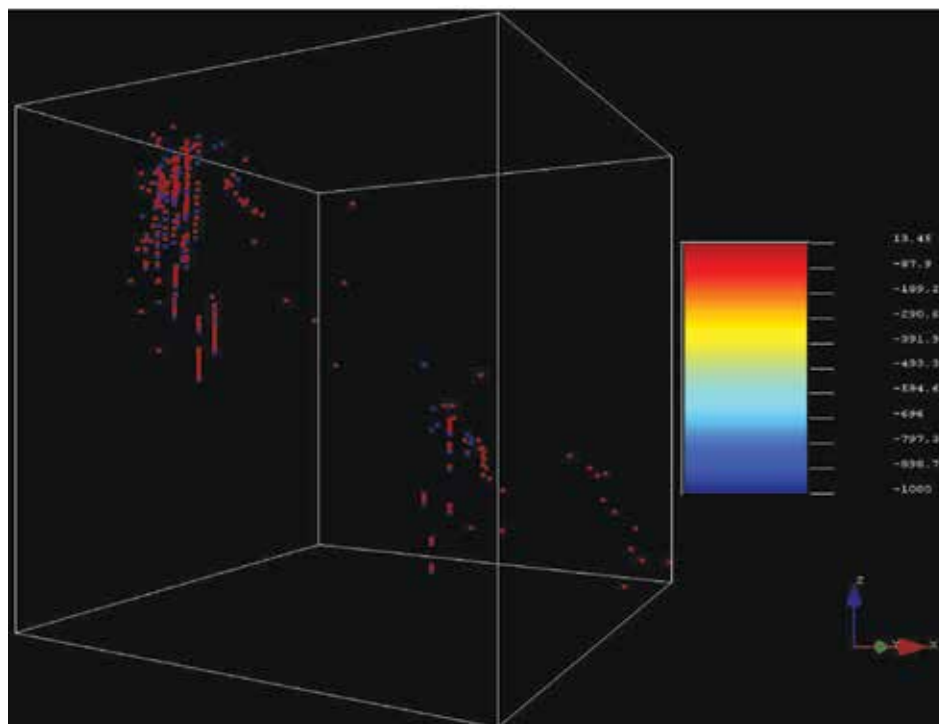
(2006 نشان داده شده است. در این شکل ابعاد شبکه (بلوک بزرگ) دربرگیرنده داده‌ها، $135 \times 351 \times 260$ متر و اندازه هر سلول $1 \times 2 \times 2$ متر انتخاب شده است. همچنین به منظور دید بهتر، ارتفاع گمانه‌ها تا پنج برابر بزرگ‌نمایی شده است.

در شکل ۹ موقعیت پراکندگی سه‌بعدی نمونه‌های سطحی و ۳۰ حلقه گمانه اکتشافی برداشت شده در سطح گستره کانسار طلای زرزیما به همراه تغییرات لگاریتم عیار طلا در آن‌ها و مرز گستره بلوک‌بندی شده، به کمک نرم‌افزار SGeMS (Remy, 2009; Bohling, 2007; Remy

طراحی اندازه و ابعاد بهینه بلوک‌های تخمین ذخیره بر اساس معیارهای مختلف ...



شکل ۸. نمودار فراوانی‌نما و توزیع احتمال، (الف) داده‌های عیارسنجی طلا، (ب) داده‌های تبدیل‌یافته عیارسنجی طلا در کل کانسار طلای زرزیمای موجش

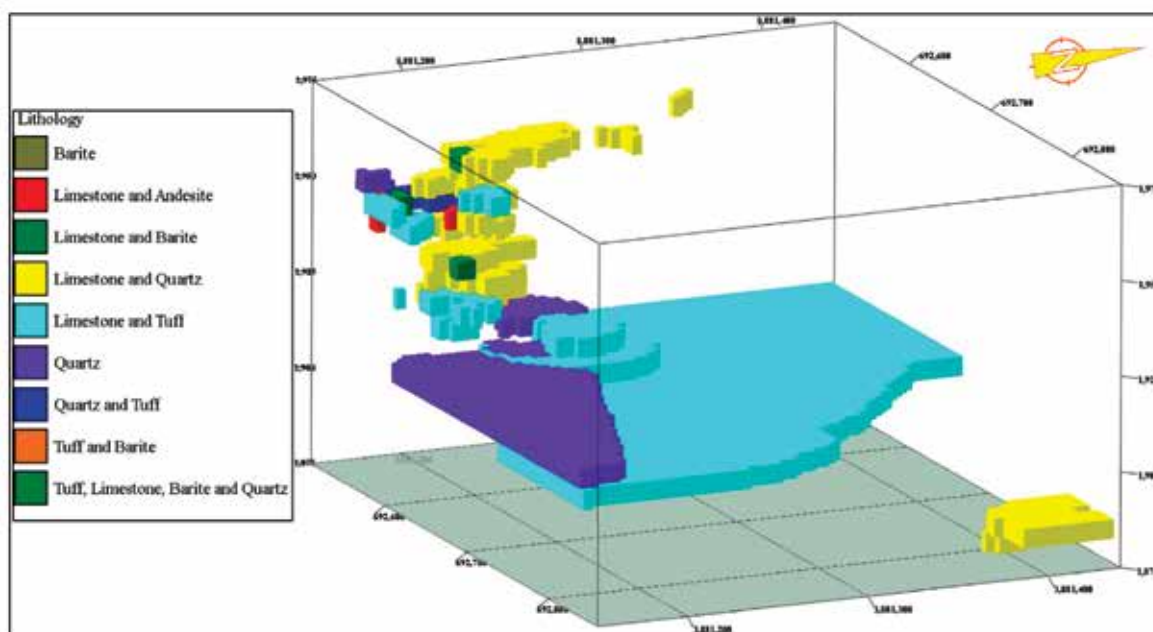


شکل ۹. نمایش موقعیت فضایی لگاریتم داده‌های عیارسنجی طلای نمونه‌های سطحی و گمانه‌های اکتشافی کانسار زرزیمای موجش درون گستره بلوکی در نرم‌افزار SGeMS

مدل سه‌بعدی لیتولوژی ذخیره

صورت گرفته است. مطابق این شکل ماده معدنی در نه نوع لیتولوژی وجود دارد که به‌صورت پراکنده و البته در مجموع بخش کوچکی از کل حجم گستره را تشکیل می‌دهند. این مدل به‌عنوان یک راهنمای اولیه در ساخت مدل جامد کانسار براساس داده‌های عیارسنجی، کمک‌کننده خواهد بود.

در شکل ۱۰ مدل جامد ماده معدنی کانسار طلای زرزیما فقط به کمک لیتولوژی ایجاد شده است. در واقع این مدل به‌کمک تمام انواع لیتولوژی‌های دارای ماده معدنی در گستره، ساخته شده است. سلول‌های تشکیل‌دهنده این مدل به ابعاد $5 \times 5 \times 5$ متر هستند و به‌منظور نمایش بهتر در این شکل، بزرگ‌نمایی در راستای قائم تا دو برابر



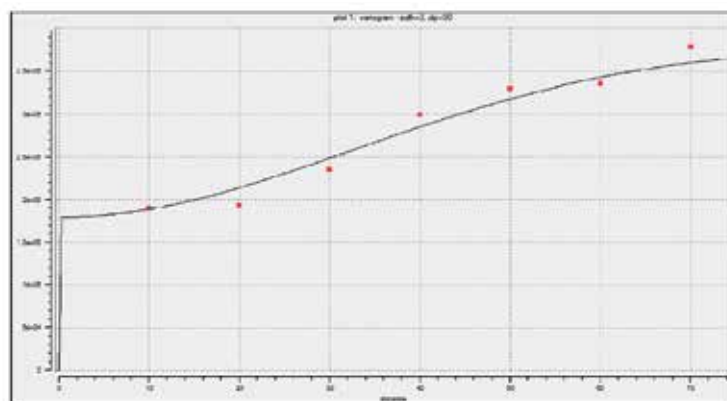
شکل ۱۰. مدل جامد ماده معدنی کانسار طلای زرزیماي موش به کمک لیتولوژی

تجزیه و تحلیل ساختار فضایی داده‌های عیارسنجی طلا

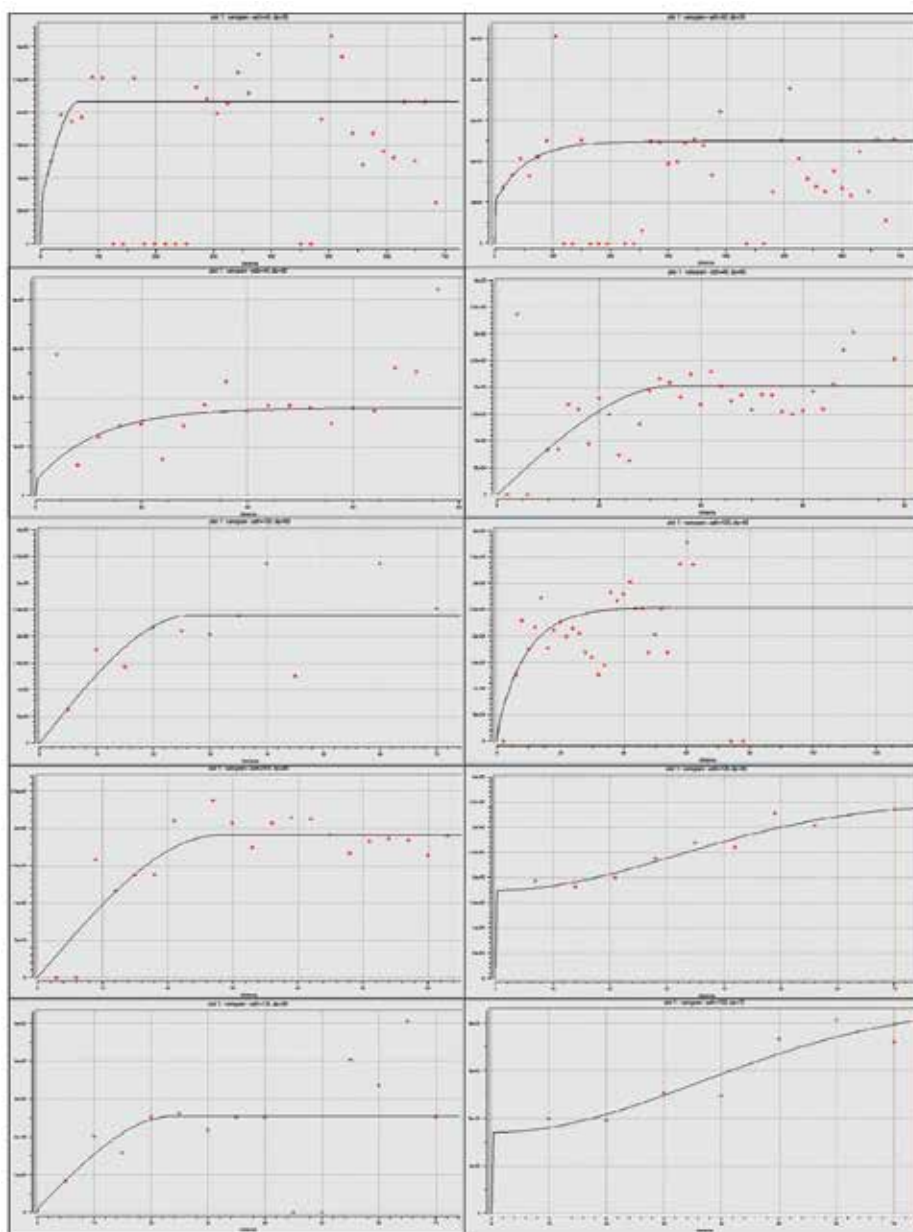
داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ساختار فضایی حاکم بر توزیع عیار در این گستره در فواصل کم به‌خوبی در تغییرنما عمقی پدیدار شده است. به‌منظور تجزیه و تحلیل ساختار فضایی گستره به‌جز تغییرنما در راستای عمقی، تغییرنماهای امتدادی با آزمون‌های ۴۰، ۴۵، ۱۲۰، ۱۳۰ و ۱۳۵ درجه نیز رسم شد. نمودار تغییرنماهای امتدادی رسم‌شده در جهت‌های مختلف، در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

برای تشخیص ساختار فضایی عیار طلای حاکم بر گستره، تغییرنماهای امتدادی (Hassani-pak, 1998; Rendu, 1981) در جهت‌های مختلف رسم شد. پارامترهای اولیه مربوط به محاسبه تغییرنماها براساس هندسه شبکه حفاری و متوسط طول نمونه‌های مغزه‌ای، انتخاب شدند. با توجه به لاگ‌نرمال بودن توزیع داده‌های عیارسنجی طلا، به‌منظور اجتناب از پیدایش ناهمسانگردی دروغین، واریوگرافی برای مقادیر تبدیل‌یافته انجام شد. در شکل ۱۱ نمودار تغییرنما در راستای عمقی (با شیب ۹۰ درجه) نشان

طراحی اندازه و ابعاد بهینه بلوک‌های تخمین ذخیره بر اساس معیارهای مختلف ...



شکل ۱۱. تغییرنمای داده‌های عیارسنجی طلا در راستای عمقی



شکل ۱۲. تغییرنماهای امتدادی رسم‌شده در جهت‌های مختلف برای داده‌های عیارسنجی طلا

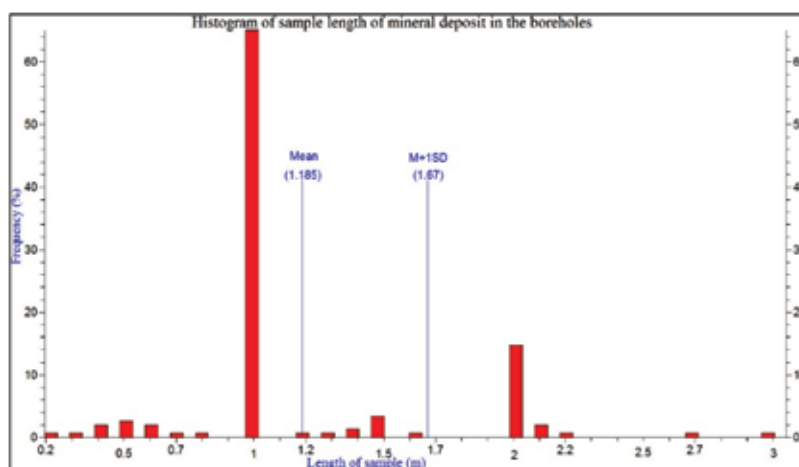
جدول ۳. مشخصات بیضوی جستجو

پارامتر	راستا (درجه)	طول (متر)	شیب (درجه)
شعاع بزرگ	۳۱۰	۲۶	۴۰
شعاع متوسط	۴۵	۲۰	۶۰
شعاع کوچک	۱۳۵	۱۴	۵۰

ساخت مدل سه‌بعدی کانسار

در شکل ۱۳ نمودار درصد فراوانی طول نمونه‌های مغزه‌ای نشان داده شده است. مطابق این شکل بیشترین فراوانی، مربوط به طول نمونه‌های برابر با یک متر است و ۸۴ درصد از نمونه‌ها دارای طولی کمتر از ۱/۷ متر هستند. بنابراین برای هم‌وزن کردن داده‌ها، طول یک متر برای کامپوزیت‌سازی نمونه‌ها انتخاب شد.

مطابق نمودار تغییرنماهای امتدادی رسم شده در شکل ۱۲ انواع مدل‌های تئوری تغییرنما شامل کروی، گوسی و نمایی بر تغییرنماهای تجربی امتدادی در جهت‌های مختلف، منطبق شده‌اند. همچنین تغییرنماهای امتدادی در جهت‌های مختلف دارای سقف کم‌وبیش یکسان ولی شعاع تاثیر متفاوت هستند؛ بنابراین منطقه مورد مطالعه دارای ناهمسانگردی از نوع هندسی می‌باشد. برای تغییرنماهای امتدادی نوع کروی، $\frac{2}{3}$ دامنه تاثیر تغییرنما و برای تغییرنما نوع نمایی مقدار فاصله همانند ۹۵٪ سقف تغییرنما به عنوان شعاع جستجو منظور شد. با برازش یک بیضوی بر شعاع‌های تاثیر تغییرنماهای امتدادی مختلف، شعاع‌های بیضوی جستجوی نهایی برای عیار طلا در گستره، مطابق جدول ۳ انتخاب شد. این پارامترها در تخمین با روش درون‌یابی لاگ کریجینگ معمولی بکار گرفته می‌شوند.



شکل ۱۳. نمودار درصد توزیع فراوانی طول نمونه‌ها

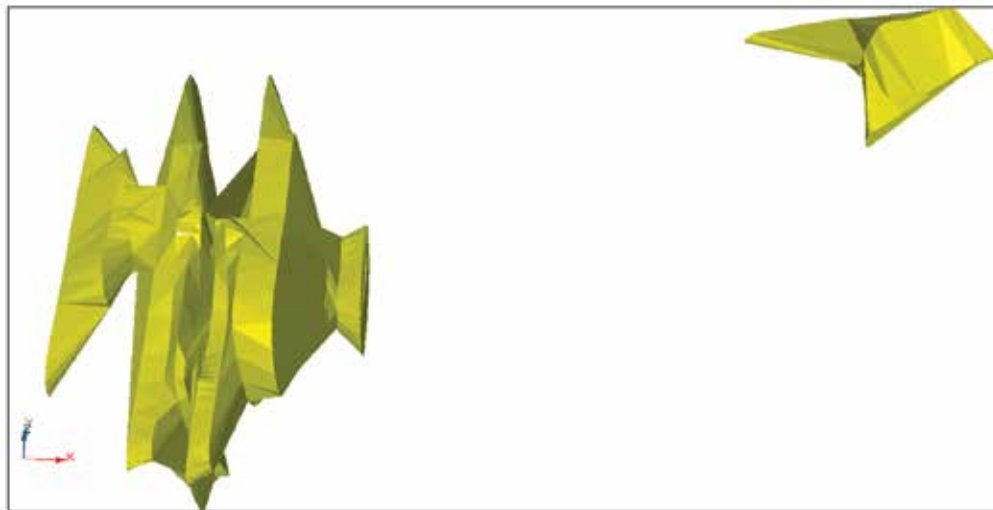
ابتدا لازم است که چال‌های انفجار حفر شود و بعد از خرج‌گذاری، کانسار منفجر شود تا توده سنگ به قطعات کوچک‌تر و قابل بارگیری تبدیل شود. همواره چال‌های انفجار به صورت شبکه‌های منظم مربعی یا مستطیلی طراحی می‌شوند. فاصله بین چال‌ها در یک ردیف را فاصله ردیفی چال‌ها می‌گویند که برای انفجارهای متعارف همواره بیشتر از اندازه بارسنگ می‌باشد. فرمول کلی بین بارسنگ (S) و فاصله ردیفی چال‌ها (B) به صورت رابطه ۲ است (افروغ، ۱۳۸۹):

$$S = (1-2)B$$

قبل از تخمین عیار باید ابتدا فضای تخمین مشخص شود که این موضوع از طریق ساخت مدل رشته‌ای و سپس مدل جامد کانسار انجام می‌شود. بر این اساس با استفاده از موقعیت نمونه‌های گستره کانسار، ساخت مدل رشته‌ای انجام شده و با اتصال آن‌ها مطابق شکل ۱۴ مدل جامد کانسار تولید شد.

ابعاد بهینه بلوک‌های کانسار

برای استخراج بسیاری از انواع مواد معدنی به‌ویژه کانسارهای فلزی همانند طلا، مس، سرب، روی و آهن



شکل ۱۴. مدل جامد کانسار طلای زرزیم (جهت شمال در راستای محور Y می‌باشد)

متوسط مقادیر داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی در گستره کانسار طلای زرزیم برابر با ۶۶/۵٪ است و مطابق مرجع (معاونت نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۰) این مقدار RQD متناظر با سنگ‌های بلوکی و سخت می‌باشد، بنابراین به هنگام انفجار و آتشباری این توده کانسار باید فواصل چال‌های انفجار کم‌وبیش برابر با فاصله بارسنگ انتخاب شود. بنابراین، اندازه شبکه اولیه چال‌های انفجار برای این کانسار برابر با پنج متر طراحی می‌شود. در پژوهش حاضر به منظور تعیین ابعاد بهینه بلوک‌های کانسار طلای زرزیم، از معیارهای اندازه شبکه اکتشاف، پارامتر RQD و واریانس کریجینگ استفاده شد. در جدول ۴ معیارهای مورد نظر و اندازه و ابعاد نهایی بلوک‌های طراحی شده برای کانسار زرزیم خلاصه شده است.

در این رابطه هرچه نسبت ارتفاع پله (H) به بارسنگ بیشتر باشد، ضریب بزرگ‌تری در نظر گرفته می‌شود ولی در شرایط معمولی $S/B/4 = 1$ می‌باشد. در انتخاب فاصله ردیفی چال‌ها، شرایط زمین‌شناسی، نوع ماده منفجره، روش انفجار و تجربیات قبلی باید لحاظ شوند. یکی از موارد موثر در انتخاب ابعاد شبکه چال‌های انفجار میزان مقاومت یا سختی سنگ است که آن نیز با استفاده از معیارهای اندازه‌گیری همانند RQD تعیین می‌شود. ارتباط بین میزان RQD، وضعیت سنگ و بارسنگ نیز در مراجعی همانند (معاونت نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۰) آورده شده است. بنابراین با استفاده از مطالب مذکور و داده‌های مرجع (معاونت نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۰) می‌توان برای یک کانسار به کمک داده‌های RQD اندازه و ابعاد شبکه اولیه چال‌های انفجار را طراحی نمود. از آنجایی که

جدول ۴. معیارهای مورد نظر و اندازه و ابعاد نهایی بلوک‌های کانسار زرزیم

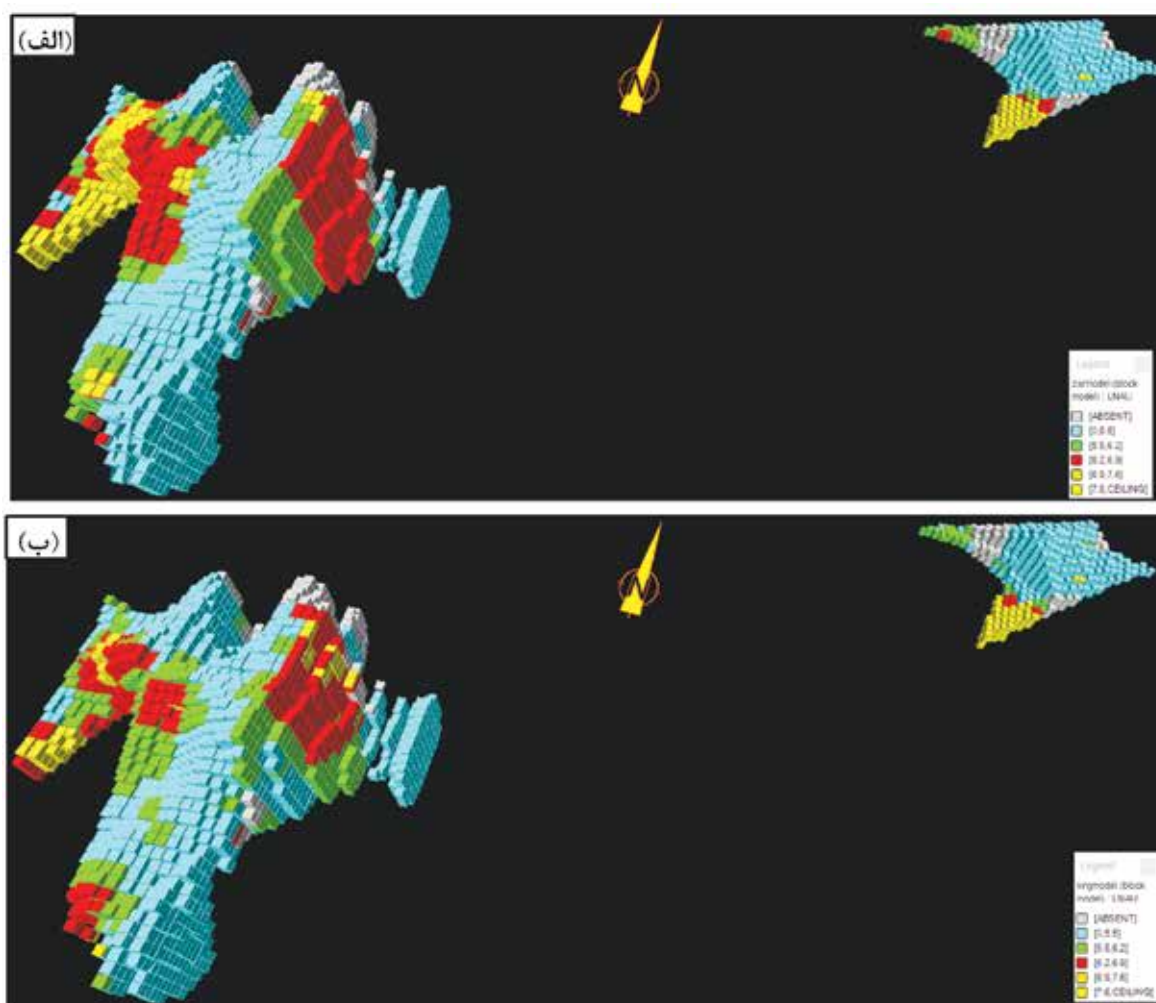
پارامتر		مقدار (متر)
اندازه و ابعاد پهنه ۱	طول	۲۹۵
	عرض	۲۱۰
اندازه و ابعاد پهنه ۲	طول	۱۷۰
	عرض	۹۰
اندازه شبکه گمانه‌های اکتشافی		۲۵×۲۵
طراحی اندازه شبکه چال‌های آتشباری و انفجار بر اساس RQD		۵×۵
اندازه و ابعاد بلوک‌های تخمین		۵×۵×۲
اندازه و ابعاد زیر بلوک‌های تخمین		۲/۵×۲/۵×۱

ساخت مدل بلوکی و تخمین ذخیره کانسار

درون‌یابی عکس مجذور فاصله و لاگ کریجینگ معمولی با استفاده از نرم‌افزار Datamine ایجاد شد. سپس با اعمال پارامترهای بیضوی جستجو، تخمین عیار هر بلوک با دو روش مذکور مطابق شکل ۱۵ انجام گرفت.

براساس وضعیت ماده معدنی، میزان و نحوه کارهای اکتشافی انجام شده و اطلاعات اکتشافی موجود، برای محاسبه ذخیره کانسار طلای زرزیم با میان روش‌های مختلف محاسبه ذخیره، دو روش عکس مجذور فاصله و لاگ کریجینگ معمولی استفاده شد و نتیجه‌های آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. روش عکس مجذور فاصله از دقیق‌ترین روش‌های هندسی تخمین ذخیره است و به همین دلیل از این روش نیز همراه با روش کریجینگ معمولی برای تخمین

برای انجام عملیات تخمین بعد از ساخت مدل جامد کانسار، فضای تخمین به بلوک‌های کوچک تقسیم می‌شود تا امکان تخمین عیار هر بلوک از طریق عیار نمونه‌های معلوم درون و بیرون آن فراهم شود. در پژوهش حاضر برای ایجاد مدل بلوکی کانسار، اندازه اولیه هر بلوک مادر (اصلی) براساس اطلاعات موجود تا این مرحله از فرآیند، پنج در پنج متر در جهت‌های افقی و دو متر در جهت قائم انتخاب شد. همچنین به‌منظور تخمین دقیق‌تر و تفکیک بهتر کانسنگ از باطله به‌ویژه در مرزها، بلوک‌های اصلی با این ابعاد به بلوک‌های کوچک‌تر (زیربلوک‌ها) با اندازه $2/5$ در $2/5$ متر در جهت‌های افقی و یک متر در جهت قائم تبدیل شدند. با معرفی مدل جامد و ابعاد بلوک‌ها، مدل بلوکی با دو روش

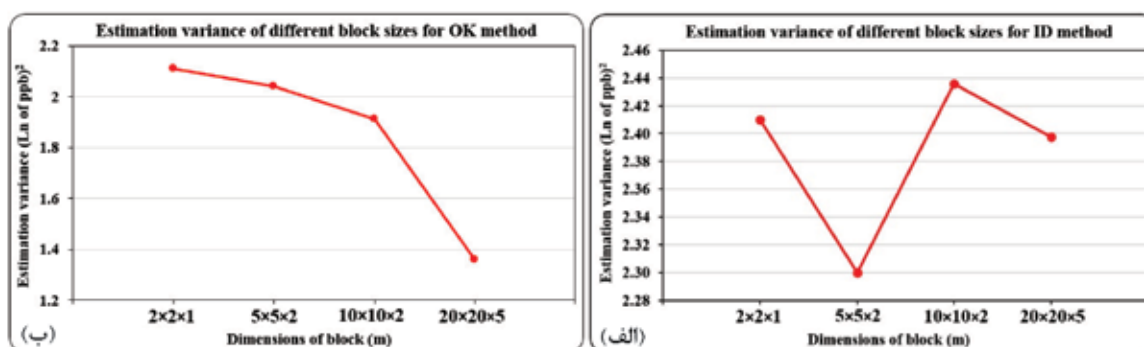


شکل ۱۵. مدل بلوکی عیار کانسار طلای زرزیم با روش‌های (الف) عکس مجذور فاصله، (ب) لاگ کریجینگ معمولی

بلوک، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر نمودار شکل ۱۶ درستی فرایند تخمین با روش لاگ کریجینگ معمولی را تایید می‌کند. اگرچه کمترین میزان واریانس تخمین عیار مربوط به اندازه بلوک $20 \times 20 \times 5$ متر است، ولی براساس تمام معیارهای بیان شده در پژوهش حاضر، اندازه بلوک $5 \times 5 \times 2$ متر به عنوان اندازه بلوک بهینه برای تخمین عیار و ذخیره کانسار مورد مطالعه با روش لاگ کریجینگ معمولی انتخاب شد. بدون در نظر گرفتن عیار حد، برای روش کریجینگ معمولی متوسط عیار تمام بلوک‌های کانسار برابر با $383/35$ میلی گرم بر تن و متوسط واریانس تخمین عیار تمام بلوک‌ها برابر با $2/04$ (لگاریتم میلی گرم بر تن)^۲ به دست آمد. همچنین برای روش عکس مجذور فاصله، متوسط عیار تمام بلوک‌های کانسار برابر با $514/72$ میلی گرم بر تن و متوسط واریانس تخمین عیار تمام بلوک‌ها برابر با $2/3$ (لگاریتم میلی گرم بر تن)^۲ محاسبه شد.

ذخیره کانسار طلای زرزیم استفاده شد. برای تخمین متوسط عیار و میزان ذخیره کانسار طلای زرزیم با روش‌های مذکور، به منظور دستیابی به نتیجه‌های مطلوب براساس اندازه و ابعاد بهینه بلوک، ابتدا مقدار متوسط عیار طلا و واریانس تخمین مربوطه به ازای اندازه بلوک‌های مختلف تعیین شد. در شکل ۱۶ نتیجه‌های این بررسی‌ها به صورت نمودار تغییرات واریانس تخمین عیار به ازای اندازه بلوک‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۶-الف برای روش عکس مجذور فاصله، میزان واریانس تخمین عیار به ازای اندازه بلوک $5 \times 5 \times 2$ متر نسبت به سایر اندازه بلوک‌ها کمتر است. در نتیجه این اندازه بلوک به عنوان اندازه بهینه بلوک برای تخمین عیار و ذخیره کانسار مورد مطالعه با روش عکس مجذور فاصله، انتخاب شد.

با توجه به شکل ۱۶-ب و مطابق انتظار در روش کریجینگ، میزان واریانس تخمین عیار با افزایش اندازه



شکل ۱۶. نمودار تغییرات واریانس تخمین عیار کانسار طلای زرزیم با روش‌های الف) عکس مجذور فاصله، ب) لاگ کریجینگ معمولی به ازای اندازه بلوک‌های مختلف

عیار حد (به جز عیار حد 2000 ppb) متوسط عیار تخمینی با روش عکس مجذور فاصله از روش لاگ کریجینگ معمولی بیشتر است. همچنین میزان ذخیره محاسبه شده به ازای عیار حد‌های پایین (250 ppb) و بالا (2000 ppb) با دو روش عکس مجذور فاصله و لاگ کریجینگ معمولی کم و بیش برابر است، در حالی که به ازای عیار حد‌های 500 و 1000 میلی گرم بر تن مقادیر تخمینی توسط روش عکس مجذور فاصله بیشتر است.

شکل ۱۷ نیز نمودار عیار-تناژ کانسار طلای زرزیم را به ازای عیار حد‌های مختلف با استفاده از روش‌های به کار رفته

بر اساس شرایط استخراج، ارزش روز ماده معدنی و ارزش فلز طلا در آینده، عیار حد‌های 250 ، 500 ، و 1000 ppb برای این کانسار انتخاب گردید و میزان ذخیره ماده معدنی به ازای عیار حد‌های مذکور محاسبه شد. نتیجه‌های محاسبه متوسط عیار، میزان ذخیره و متوسط واریانس تخمین عیار کانسار در جدول ۵ خلاصه شده است. وزن مخصوص متوسط ماده معدنی نیز براساس نتیجه‌های آزمایش تعداد سه نمونه (دو نمونه از گمانه‌ها و یک نمونه از ترانشه‌ها) برابر با $2/7$ گرم بر سانتی متر مکعب منظور شد. با توجه به داده‌های این جدول، به ازای اغلب مقادیر

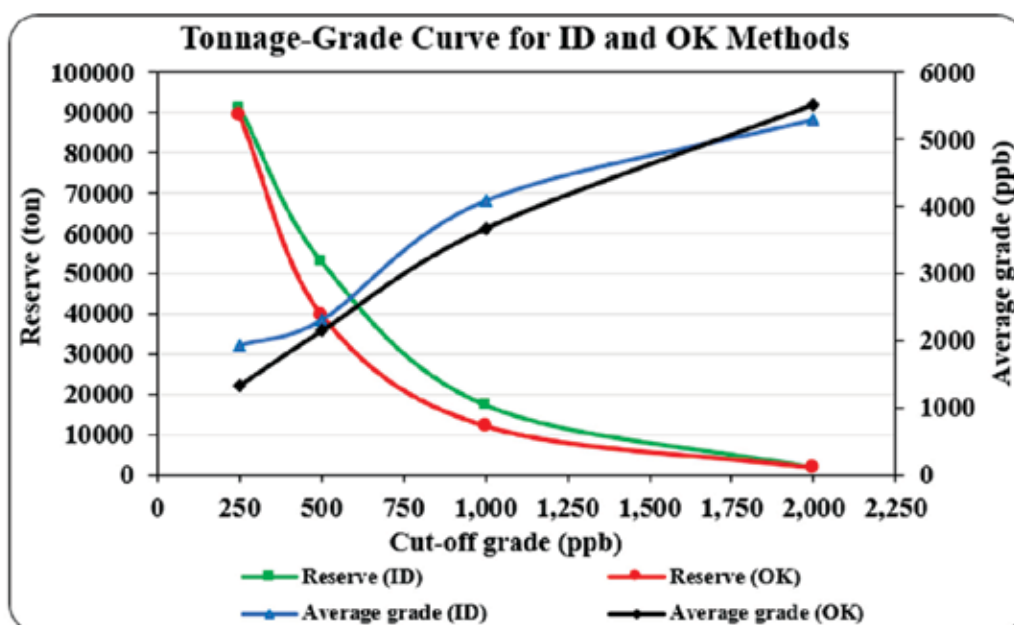
جدول ۵. نتیجه‌های تخمین ذخیره کانسار طلای زرزیم با روش‌های مختلف

روش تخمین ذخیره	عیار حد (میلی‌گرم بر تن)	عیار متوسط (میلی‌گرم بر تن)	میزان ذخیره (تن)	متوسط واریانس تخمین عیار (میلی‌گرم بر تن) ^۲
عکس مجذور فاصله	۲۵۰	۱۹۳۱/۳۵	۹۱۲۴۳/۱۳	۲/۳۱
	۵۰۰	۲۳۰۹/۰۱	۵۳۰۰۴/۳۸	۱/۹۲
	۱۰۰۰	۴۰۸۶/۷۲	۱۷۳۸۱/۲۵	۲/۰۸
	۲۰۰۰	۵۲۹۶/۳۲	۱۸۲۲/۵۰	۱/۶۷
	۲۵۰	۱۳۲۹/۳۱	۸۹۰۶۶/۲۵	۱/۸۶
لاگ کریجینگ معمولی	۵۰۰	۲۱۴۰/۲۳	۳۹۶۷۳/۱۳	۱/۷۸
	۱۰۰۰	۳۶۶۲/۶۷	۱۲۱۶۶/۸۸	۱/۷۸
	۲۰۰۰	۵۵۰۳/۹۳	۱۸۳۹/۳۸	۱/۶۱

تخمین عیار با روش لاگ کریجینگ معمولی به ازای تمام عیارهای حد مختلف، نسبت به روش عکس مجذور فاصله کمتر است و مطابق انتظار عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. به هر جهت اگرچه روش لاگ کریجینگ معمولی روش دقیق‌تری نسبت به روش عکس مجذور فاصله است ولی عدم امکان بازیابی واریانس تخمین، از معایب آن است. نکته پایانی آنکه روش‌های تخمین زمین‌آماري در صورت در دسترس بودن تعداد داده اکتشافی کافی و وجود ارتباطات فاصله‌ای و فضایی بین داده‌ها، همواره از تمام روش‌های تخمین هندسی دقیق‌تر هستند.

نشان می‌دهد. مطابق این شکل، به‌طور کلی روند نمودارهای عیار-تناژ کانسار یعنی افزایش میزان عیار متوسط و کاهش میزان ذخیره کانسار با افزایش میزان عیار حد، درستی انجام فرآیند تخمین را تایید می‌کنند.

اما پاسخ این سوال که کدام روش بهتر است و همواره باید مورد استفاده قرار گیرد، به عوامل زیادی از جمله شرایط و خصوصیات کانسار، وضعیت داده‌های اکتشافی و میزان شناخت از کانسار بستگی دارد. یکی از معیارهای مقایسه و سنجش عملکرد دو روش تخمین، میزان واریانس تخمین است. داده‌های جدول ۵ نشان می‌دهد که میزان واریانس



شکل ۱۷. نمودار عیار-تناژ کانسار طلای زرزیم با روش‌های مختلف

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل‌سازی بلوکی کانسار طلای زرزیمای موچش با استفاده از بلوک‌های با اندازه و ابعاد بهینه به منظور تخمین عیار و میزان ذخیره کانسار صورت گرفت. برای دستیابی به هدف، تمامی عوامل موثر بر روی انتخاب اندازه و ابعاد بهینه بلوک شامل اندازه و ابعاد شبکه حفر گمانه‌های اکتشافی (اندازه شبکه اکتشاف)، اندازه و ابعاد گستره کانسار، زمین‌شناسی کانسار، پارامتر شاخص کیفی سنگ و میزان خطای تخمین بلوک‌ها مد نظر قرار گرفت و با در نظر گرفتن همه عوامل، در نهایت اندازه بلوک‌های تخمین 5×5 متر در راستاهای افقی و دو متر در راستای قائم تعیین شد. در ادامه مدل‌سازی بلوکی و تخمین متوسط عیار هر بلوک و میزان ذخیره کانسار با روش‌های دقیق هندسی عکس مجذور فاصله و زمین‌آماري لاگ کریجینگ معمولی بلوکی انجام شد. در نهایت به کمک میزان عیار و خطای تخمین عیار هر بلوک، متوسط عیار و میانگین خطای تخمین تمام بلوک‌های کانسار محاسبه شد.

در عمل هیچ روش نظری و محاسباتی مستقیمی برای تعیین اندازه بهینه بلوک‌های تخمین وجود ندارد و اغلب کاربران، اندازه بلوک‌ها را تن‌ها براساس یک معیار معمول انتخاب کرده و با سعی و خطا تلاش می‌کنند تا نتیجه‌های تخمین را با خطای کمتر همراه کنند. از آنجایی که اندازه بلوک‌های تخمین تاثیر مستقیم و چشم‌گیری بر روی دقت نتیجه‌های تخمین عیار و میزان ذخیره کانسارها می‌گذارند، بنابراین در پژوهش حاضر، استفاده از معیارهای تاثیرگذار دیگر بر روی اندازه بلوک‌ها همانند شاخص کیفی سنگ و میزان خطای تخمین علاوه بر معیارهای معمول، منجر به انتخاب اندازه بهینه بلوک‌های مدل بلوکی و در نتیجه درجه اعتماد بالای نتیجه‌های تخمین عیار و میزان ذخیره کانسار شد.

برای دستیابی به بهترین و مطلوب‌ترین نتیجه در انتخاب روش تخمین ذخایر معدنی نیز، بهتر است که برای محاسبه ذخیره یک کانسار از چند روش مختلف به‌ویژه از روش‌های نوین و دقیق زمین‌آماري استفاده کرد و نتیجه‌های آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود

در منطقه مورد مطالعه در موقعیت گره‌های شبکه اکتشافی فاقد گمانه اکتشافی به‌ویژه در فضاهای تهی بین گمانه‌های اکتشافی موجود، گمانه‌های اکتشافی جدید حفر شوند تا شبکه اکتشاف منظم‌تر شده و اطلاعات اکتشافی گستره کامل‌تر شود. نتیجه‌های این پژوهش برای کلیه متخصصین علوم زمین درگیر با مسائل زمین‌شناسی اقتصادی و تخمین و ارزیابی ذخایر معدنی، قابل اهمیت و کاربردی خواهد بود.

منابع

- احمدی، ر.، ۱۳۹۹. مقایسه نتیجه‌های روش‌های زمین‌آماري خطی و غیرخطی در مدل‌سازی و ارزیابی ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی ساوه، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۴، ۵۶، ۴۳-۵۹.
- افروغ، م.ر.، ۱۳۸۹. طراحی الگوی حفاری و انفجار به منظور تولید خوراک مناسب برای سنگ‌شکن معدن کارخانه سیمان بجنورد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- عسکری، ع.، کریم‌پور، م.ح.، مظاهری، س.ا.، ملک‌زاده‌شفاوردی، آ.، ۱۳۹۲. مدل‌سازی هندسی و برآورد ذخیره کانسار طلای شماره ۳ هیرد (جنوب بیرجند)، پنجمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، شهر مشهد.
- عطایی‌پور، م.، ۱۳۹۸. مبانی مدل‌سازی دوبعدی ذخایر معدنی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۳۲۶ ص.
- کاظمی مهرنیا، ا.، شرکت پارسی کان کاو، ۱۳۹۹. گزارش پایان عملیات اکتشافی محدوده طلا زرزیمای موچش- استان کردستان، ۱۶۸.
- معاونت نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۰. دستورالعمل طراحی و اجرای سیستم‌های نگهداری تونل‌های معدنی، نشریه شماره ۵۳۷.

- Ahmadi, R. and Ehsan-nejad, J., 2022. Employing non-linear geostatistical estimation methods for grade modeling and ore reserve estimation of Yazd, Aliabad copper deposit based on selecting optimal size of blocks, Earth and Statistics, 2(1): 1-12.

- Akingboye, A.S., 2023. RQD modeling using statistical-assisted SRT with compensated ERT methods: Correlations between borehole-based and SRT-based RMQ models, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 131, 103421.
- Azmi, H., Moarefvand, P. and Maghsoudi, A., 2020. Resource estimation of the Damanghor gold deposit (Brdaskan, Northeast Iran) based on geological and grade continuity. *Geopersia*, 10 (2): 381-394.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley, 272 p.
- Bohling, G., 2007. SGeMS Tutorial Notes, 26.
- Carter, T.G., 1992. Prediction and uncertainties in geological engineering and rock mass characterization assessments. *Proceeding of 4th International rock mechanics and rock engineering conference*, Torino.
- Chanderman, L., Dohm, C.E. and Minnitt, R.C.A., 2017. 3D geological modelling and resource estimation for a gold deposit in Mali, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117 (2): 189-197, <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n2a10>.
- David, M., 1979. Grade and tonnage problems. *Computers method for the 80s in the mineral industry*. In: A. Weiss (ed). New York; 170-189.
- Deere, D.U., 1963. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Fels-mechanik und Ingenieurgeologie*, 1: 16-22.
- Deere, D.U., 1989. Rock quality designation (RQD) after 20 years. U.S. Army Corporations Engineers Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.
- Goodman, R.E., 1991. *Introduction to rock mechanics*, 2nd edition, Wiley, 576.
- Hassani-pak, A.A., 1998. *Geostatistics*. Tehran University Press, 314. (In Persian).
- Hencher, S.R., 2015. *Practical rock mechanics*, Taylor & Francis group, London, 374.
- Hulse, D.E., 1992. The consequence of block size decisions by ore body modeling. *The 23rd International Symposium on the Application and Operation Research in the Mineral Industry (APCOM23)*, 225-232.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W. and Zimmerman, R., 2007. *Fundamentals of rock mechanics*, 4th edition, Wiley-Blackwell, 488.
- Journel, A.G. and Huijbregts, Ch.J., 1978. *Mining geostatistics*. Academic Press, New York.
- Krige, D.G., 1996. A practical analysis of the effects of spatial tructure and of data available and accessed, on conditional biases in ordinary kriging, *International Geostatistics Congress*, Wollongong, Australia.
- Lukić, D. and Zlatanović, E., 2017. RQD classification of rock masses, 10th International scientific conference "Science and Higher Education in Function of Sustainable Development", Mečavnik- Drvengrad, Užice, Serbia.
- Pells, P.J., Bieniawski, Z.T., Hencher, S.R. and Pells, S.E., 2016. RQD: time to rest in peace, *Canadian Geotechnical Journal*, 54: 825-834.
- Remy, N., Boucher, A. and Wu, J., 2006. *SGeMS User's Guide*, 129.
- Remy, N., Boucher, A. and Wu, J., 2009. *Applied geostatistics with SGeMS: A User's Guide*.
- Rendu, J.M., 1981. An introduction to geostatistical methods of mineral evaluation, *South African Institute of Mining and Metallurgy monograph series*, Johannesburg, 84.
- Rossi, M.E. and Deutsch, C.V., 2014. *Mineral resource estimation*, 1st Edition, Springer Dordrecht Heidelberg New York London.
- Tutorial-RockWare, 197. www.rockware.com/downloads/documentation/rockworks/rw16_tutorial_from_chm.pdf
- Vann, J., Jackson, S. and Bertoli, O.,

2003. Quantitative kriging neighbourhood analysis for the mining geologist-A description of the method with worked case examples, 5th International Mining Geology Conference, Bendigo, Vic, 17-19 November.
- Xu, S., Ma, J. and Liang, R. 2023. Intelligent recognition of drill cores and automatic RQD analytics based on deep learning, *Acta Geotechnica*, 18: 6027-6050.
 - Zaki, M.M., Chen, S., Zhang, J., Feng, F., Khoreshok, A.A., Mahdy, M.A. and Salim, K.M., 2022. A novel approach for resource estimation of highly skewed gold using machine learning algorithms, *Minerals* 2022, 12, 900, <http://doi.org/10.3390/min12070900>.

انتخاب پهنه مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی در سازندهای ایلام و سروک در یکی از چاه‌های نفتی میادین جنوب غربی ایران

مهران کلهری^(۱)، سجاد قره چلو^(۲) و سپیده یاسمی خیابانی^(۳)

۱. کارشناس ارشد پژوهشی گروه زمین‌شناسی نفت پژوهشکده علوم پایه کاربردی

۲. استادیار گروه زمین‌شناسی نفت، پژوهشکده علوم پایه کاربردی

۳. مربی پژوهش، گروه زمین‌شناسی نفت، پژوهشکده علوم پایه کاربردی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

چکیده

شکاف هیدرولیکی یکی از روش‌های انگیزش چاه است که به‌صورت گسترده در مخازن نفتی و گازی دنیا در حال انجام می‌باشد. انتخاب پهنه مناسب برای عملیات شکاف هیدرولیکی از نظر اقتصادی بسیار کلیدی است. پارامترهای ژئومکانیکی در انتخاب پهنه‌های کاندید بسیار مؤثر و پر اهمیت می‌باشند. از جمله مهم‌ترین پارامترهای ژئومکانیکی می‌توان به اندازه و جهت‌یابی تنش افقی مینیمم و ویژگی‌های مکانیک سنگی سازند اشاره کرد. در این مطالعه، چگونگی پهنه‌بندی و انتخاب پهنه مناسب، با استفاده از تعیین پهنه‌های تنش از تنش افقی مینیمم، تعیین پهنه‌های مکانیک سنگی با استفاده از پارامترهای مکانیک سنگی و با تلفیق این نتایج با حد برش‌های مجاز برای تخلخل و تروابی مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا، پارامترهای مکانیک سنگی شامل مدول یانگ، نسبت پواسون، مقاومت فشاری تک محوری، چقرمگی شکست، و اندیس شکنندگی سنگ با استفاده از لاگ‌های چاه و با به‌کارگیری روابط تجربی مختلف استخراج شده‌اند. با اعمال روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی به‌عنوان یکی از روش‌های یادگیری بدون نظارت یادگیری ماشین بر روی این داده‌ها، شش خوشه تعیین شده‌اند که با استفاده از این خوشه‌ها بازه مخزنی به ۱۳ پهنه A تا M تقسیم‌بندی شده است. با محاسبه مقادیر تنش‌های اصلی و فشار منفذی، از تنش افقی مینیمم برای تعیین پهنه‌های تنشی که با موانع تنشی محدود شده‌اند استفاده شده است که برای بازه مورد مطالعه در چاه شش پهنه تنشی مشخص شده است. با بررسی و تلفیق نتایج پهنه‌بندی مکانیک سنگی، پهنه‌های تنشی و پارامترهای مخزنی تخلخل و تروابی به انتخاب پهنه‌های مناسب برای شکاف هیدرولیکی پرداخته شده است که پهنه‌های تنشی شش، سه، و پنج به‌عنوان مناسب‌ترین پهنه‌ها انتخاب شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: شکاف هیدرولیکی، خوشه‌بندی سلسله مراتبی، پهنه‌بندی مکانیک سنگی، موانع تنشی، پهنه کاندید شکاف هیدرولیکی

مقدمه

در صورت استخراج پروفیل پیوسته‌ای از مهم‌ترین پارامترهای مکانیک سنگی برای هر چاه، می‌توان برای آن، پهنه‌های مکانیک سنگی تعیین کرد که هر پهنه ویژگی‌های مکانیک سنگی کم‌وبیش یکنواختی دارد و میزان مقاومت و استحکام هر پهنه مشخص است. برای تعیین این پهنه‌ها با توجه به خواص مکانیک سنگی آن‌ها می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد که یکی از بهینه‌ترین آن‌ها روش یادگیری ماشین است. با تعیین تنش افقی مینیمم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترها، و با جمع‌بندی نتایج حاصل از پهنه‌بندی مکانیک سنگی می‌توان پهنه‌های مناسب برای شکافت هیدرولیکی را تعیین کرد.

زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه

میدان مورد مطالعه در جنوب غربی ایران با روند شمال غربی-جنوب شرقی، به موازات رشته کوه زاگرس می‌باشد. مخازن اصلی این میدان شامل سازند آسماری و گروه‌های بنگستان و خامی می‌باشد. بر اساس گزارش جیمز و وایند (James and Wynd, 1965) از آلبین تا کامپانین یک چرخه رسوبی از سازندهای کژدمی، سروک، سورگاه و ایلام را می‌توان در زاگرس شناسایی کرد (شکل ۱). برخی از زمین‌شناسان معتقد هستند اگر سازند کژدمی را از این گروه حذف کنیم، چون سازند سورگاه هم در همه جای حوضه زاگرس وجود ندارد، در این صورت گروه بنگستان شامل دو سازند سروک و ایلام خواهد شد. در چنین حالتی به‌جای عنوان گروه بنگستان از سازند بنگستان که شامل دو سازند سروک (در زیر) و ایلام (در بالا) استفاده می‌شود. در نتیجه گروه بنگستان پس از ناپیوستگی سنومانین-تورنین قابل تقسیم به بنگستان پایینی (بخش سنومانین سروک) و بنگستان میانی (بخش تورنین سروک) و بنگستان بالایی (سازند ایلام) است.

سازند ایلام

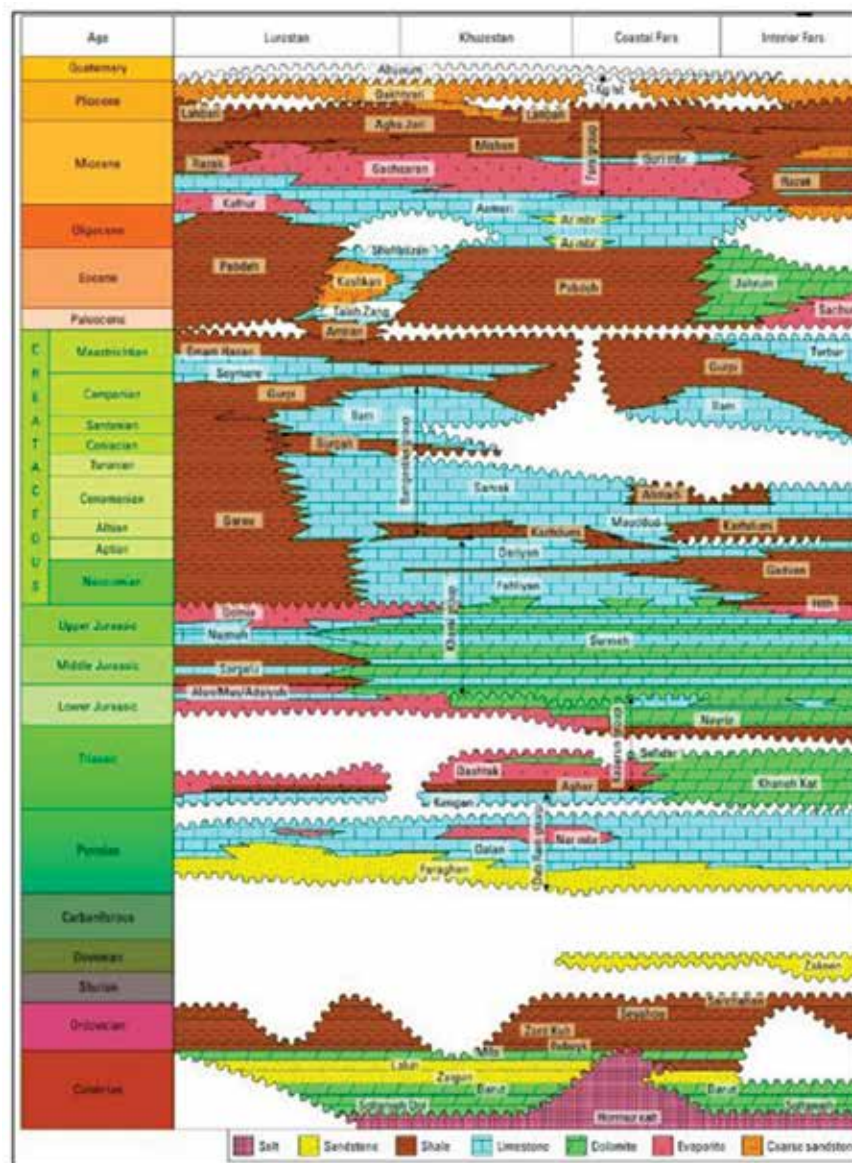
سازند ایلام با دو رخساره عمیق و کم‌عمق دیده می‌شود. برش الگوی این سازند که نشانگر رخساره عمیق است در بخش شمال باختری کبیرکوه در ۱۲ کیلومتری

شکافت هیدرولیکی یکی از روش‌های مهم انگیزش چاه به‌منظور تولید و یا افزایش تولید از سازندهای هیدروکربنی با تراوایی کم یا چاه‌های دچار افت تولید می‌باشد. این فرآیند شامل تزریق سیال‌های گوناگون به درون سازند با فشار بالا برای ایجاد شکستگی کششی در سنگ و گسترش این شکستگی در سازند می‌باشد (Economides and Nolte, 1989; Legartha et al., 2005; Hibbeler, and Rae, 2005). تعیین فواصل مناسب برای شکافت هیدرولیکی شامل ارزیابی ویژگی‌های سنگ، با شناسایی بهترین فواصل عمقی برای انجام شکافت هیدرولیکی است. اگرچه پارامترهای بسیاری در شناسایی پهنه‌های مناسب برای انجام شکافت هیدرولیکی دخیل هستند، اما مهم‌ترین این پارامترها، شامل پارامترهای مکانیک سنگی، اندازه و جهت‌یابی تنش‌ها می‌باشند (Wright et al., 1999; Willis et al., 2005; Warpinski et al., 1982; Jahandideh et al., 2016).

اهمیت این پژوهش در این است که با انتخاب دقیق پهنه‌های مناسب برای شکافت هیدرولیکی، می‌توان بهره‌وری چاه‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش داد و از افت تولید جلوگیری کرد.

در پژوهش‌های قبلی، روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی و شناسایی مناطق مناسب برای شکافت هیدرولیکی ارائه شده است. این روش‌ها شامل مدل‌های تحلیلی، شبیه‌سازی‌های عددی و استفاده از داده‌های میدانی هستند (Warpinski et al., 1982; Jahandideh et al., 2016). به‌تازگی، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تحلیل و شناسایی پهنه‌های بهینه برای شکافت هیدرولیکی به‌طور گسترده‌ای مطرح شده است و نتایج نشان می‌دهند که این روش‌ها می‌توانند دقت بالاتری در پیش‌بینی مناطق مناسب ارائه دهند (Jahandideh et al., 2016).

هدف از این پژوهش، استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای شناسایی دقیق‌تر پهنه‌های بهینه شکافت هیدرولیکی در سازندهای با تراوایی کم است. این پژوهش با استفاده از داده‌های تجربی سازندها، به دنبال ارائه یک مدل بهینه برای انتخاب فواصل مناسب شکافت هیدرولیکی می‌باشد.



شکل ۱. ستون چینه‌شناسی مقایسه‌ای بین تقسیمات حوضه‌ای زاگرس (گروه بنگستان شامل: سازندهای کژدمی، سروک، سورگاه و ایلام)

سبز)، دانه‌های غیر اسکلتی (انئید، اینتراکست و پلوئید) در یک محیط رمپ کربناته کم شیب می‌باشد. از نظر لیتولوژی شامل آهک، آهک دولومیتی و مقادیر جزئی و پراکنده شیل است. سازند ایلام با یک ناپیوستگی قابل توجه بر روی سازند سروک و شیل‌های لافان قرار می‌گیرد.

سازند سروک

در گذشته به این واحد سنگی، سنگ‌آهک‌های هیپوریت دار، سنگ‌آهک‌های رودیست دار که سنگ‌آهک لشتگان گفته می‌شد ولی با مطالعه برش آن در تنگ سروک در

شهرستان ایلام قرار دارد. در این برش، سازند ایلام شامل ۱۹۰ متر سنگ‌آهک‌های رسی دانه‌ریز پلاژیک خاکستری رنگ با لایه‌بندی منظم و میان لایه‌های نازک شیل و سن سانتونین-کامپانین است. رخساره‌های کم‌عمق سازند ایلام، در نواحی فارس و خوزستان گسترش دارد که شامل سنگ‌آهک‌های قله‌ای است که همچنان سن سانتونین تا کامپانین دارد. سازند ایلام در میدان مورد مطالعه ضخامت در حدود ۱۸۵ متر دارد. این سازند به صورت هتروژن است و متشکل از رخساره‌های کربناته کم‌عمق تا عمیق شامل، دانه‌های اسکلتی (روزن‌داران پلانکتونیک و بنتیک، جلبک

پهنه‌های مخزنی سازند ایلام و سروک

سازند ایلام به سه پهنه مخزنی (A, B, C) بخش شده است. البته پهنه C دارای سه زیر پهنه می‌باشد. در مخزن ایلام پهنه A و B دارای آب اشباع‌شدگی بالای ۴۰ درصد بوده اما پهنه C مقدار آب اشباع‌شدگی کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد. همچنین سایر پهنه‌ها به جز پهنه‌های C1 و C2 تخلخل بسیار پایینی دارند. لذا از نظر پتروفیزیکی پهنه C1 مخزن ایلام مناسب‌ترین پهنه تولیدی می‌باشد. مخزن سروک نیز به شش پهنه (D, E, F, G, H, I) به همراه تعدادی زیر پهنه بخش شده است. این مخزن آب اشباع‌شدگی از ۳۰ تا ۴۵ درصدی و تخلخل کمتر از شش درصد دارد، به جز پهنه I2 که تخلخل در حدود ۱۱ درصد و آب اشباع‌شدگی ۳۲ درصدی دارد. لذا پهنه I2 یکی از مناسب‌ترین پهنه‌های تولیدی مخزن سروک می‌باشد. اطلاعات جزئی‌تر از پهنه‌های مختلف مخزن ایلام و سروک در جدول ۱ ارائه شده است.

کوه بنگستان واقع در شمال بهبهان نام "سروک" جایگزین نام‌های پیشین شد. سازند سروک دو رخساره متفاوت دارد. در محل برش الگو و فارس ساحلی، رخساره‌های کم‌عمق این سازند گسترش دارد. درحالی‌که در ناحیه لرستان، می‌توان رخساره‌های عمیق سازند سروک را دید. سازند سروک در میدان مورد مطالعه در حدود ۷۲۰ متر ضخامت دارد. مرز زیرین سازند سروک با سازند کژدمی پیوسته تدریجی و مرز بالا آن با ناپیوستگی فرسایشی در زیر شیل لافان قرار می‌گیرد. در این مطالعه ماهیت مرز سازندها اهمیت چندانی ندارد. رخساره‌ها این سازند شامل مادستون میلیولیدی، پکستون پلوئیدی بیوکلاست دار، گرینستون پلوئیدی فرامینیفردار، باندستون رودیستی و فلوئستون-رودستون رودیستی می‌باشد. این رخساره‌ها در یک محیط رمپ داخلی تا رمپ خارجی ته‌نشست پیدا کرده‌اند.

جدول ۱. میانگین ویژگی‌های پتروفیزیکی در پهنه‌های مختلف مخزن ایلام و سروک

Formation	Reservoir Zonation	Thickness (m)	Hydrocarbon Column (m)	Sw (%)	Porosity (%)	
					Total	Effective
ILAM	A	۱۹	۰/۱	۴۴/۸	۶/۶	۴/۳
	B	۱۳/۵	۰/۰۰۵۶	۴۶/۸	۵/۳	۲/۷
	C1	۴۱	۶/۴	۱۴/۴	۱۸/۵	۱۸/۴
	C2	۳۸	۵/۱	۱۵/۶	۱۶/۱	۱۶/۱
	C3	۷۵	۴/۱	۲۵	۱۱	۸/۳
	D	۴۲	۰/۰۳۲	۲۷/۸	۵/۵	۰/۷
	E1	۱۰۷	۰/۶	۲۱/۳	۶/۴	۲/۴
	E2	۱۳۰	۳/۸	۲۶/۵	۹	۵/۶
SARVAK	F1	۴۵	۰/۱	۲۶/۷	۶/۱	۲/۳
	F2	۴۴	۰	-	-	۱/۵
	G1	۷۵	۰/۶	۳۳/۸	۵/۶	۳/۶
	G2	۵۲	۱/۵	۳۷/۱	۹/۲	۶/۴
	H	۳۰	۰/۰۲۳	۴۵/۹	۵/۵	۲/۶
	H-1	۳۲	۰/۰۴۱	۴۲/۶	۶/۶	۴/۵
	H-2	۴۷	۰	-	-	۱/۷
	I2	۸۵	۵/۸	۳۲/۱	۱۱/۳	۱۱/۲

روش مطالعه

داده‌های موجود برای این مطالعه شامل لاگ‌های سرعت امواج صوتی برشی و فشاری، تخلخل، چگالی، و گاما و نتیجه چهار نمونه آزمون مکانیک سنگی مقاومت فشاری تک‌محوره، همچنین داده‌های آزمون چاه RFT^۱ و FIT^۲ می‌باشند. در این مطالعه با استفاده از لاگ‌های پتروفیزیکی به محاسبه پارامترهای الاستیک مدول یانگ و ضریب پواسون، چقرمگی شکست، مقاومت فشاری تک‌محوره و اندیس شکنندگی سنگ محاسبه خواهند شد. پارامترهای الاستیک دینامیک با استفاده از لاگ‌های صوتی، محاسبه خواهد شد و با استفاده از روابط تجربی توسعه داده شده برای شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب به مقادیر استاتیک تبدیل شده است. مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره با استفاده از رابطه تجربی توسعه داده شده برای شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب محاسبه شده و مقادیر پارامترهای الاستیک و مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ تخمین زده شده، با استفاده از نتایج آزمون‌های مکانیک سنگی دقت سنجی شده است. پارامتر چقرمگی شکست با استفاده از یک رابطه تجربی و با به‌کارگیری سرعت موج فشاری محاسبه شد. همچنین برای محاسبه مقاومت کششی سنگ از رابطه تجربی بر اساس تخلخل استفاده شد و از این پارامتر و مقاومت فشاری تک‌محوره برای محاسبه مقادیر اندیس شکنندگی سنگ نیز استفاده شد. از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی به‌عنوان یکی از روش‌های یادگیری ماشین، برای تعیین پهنه‌های مکانیک سنگی استفاده می‌شود. لذا با استفاده از روابط و نتایج آزمون‌های چاه مقادیر تنش‌های اصلی و فشار منفذی محاسبه شده و از پروفیل تنش افقی مینیمم و پهنه‌های ژئومکانیکی برای تعیین پهنه‌های کاندید استفاده خواهد شد. با مطالعه و بررسی پهنه‌های مکانیک سنگی تعدادی پهنه انتخاب خواهند شد و با تلفیق نتایج وضعیت تنش افقی مینیمم و موانع تنشی پهنه‌های مناسب‌تر انتخاب می‌شوند. در نهایت با استفاده از محدودیت‌های لازم از لحاظ پارامترهای مخزنی تخلخل و تولید آب از میان پهنه‌های تعیین شده، پهنه‌های نهایی کاندید معرفی خواهند شد.

استخراج پارامترهای مکانیک سنگی

استخراج پارامترهای مکانیک سنگ در مطالعات ژئومکانیکی اهمیت زیادی دارد و پایه اصلی ساخت مدل‌های ژئومکانیکی می‌باشد. مهم‌ترین پارامترهای مکانیک سنگی که در مدل‌سازی‌های ژئومکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل پارامترهای الاستیک سنگ (مدول یانگ و نسبت پواسون)، و مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ است. برای مطالعات مربوط به شکاف هیدرولیکی، پارامترهای چقرمگی شکست و اندیس شکنندگی نیز دارای اهمیت هستند. به دلیل کم‌هزینه‌تر بودن و امکان استخراج این پارامترها به‌صورت پیوسته، از لاگ‌های چاه برای این منظور استفاده می‌شود و از آزمون‌های مکانیک سنگی بر روی نمونه‌های حاصل از مغزه می‌توان برای صحت سنجی یا افزایش دقت کار استفاده کرد.

مدول الاستیسته و نسبت پواسون

متداول‌ترین نگارها که جهت تخمین پارامترهای الاستیک سنگ استفاده می‌شوند، شامل نگارهای صوتی و چگالی می‌باشند. با در اختیار داشتن این داده‌ها و استفاده از روابط الاستیک سنگ می‌توان پارامترهای مکانیک سنگی لایه‌های زیرسطحی را به‌صورت دینامیکی و پیوسته محاسبه نمود. مدول الاستیسته و نسبت پواسون از طریق روابط ۱ و ۲ قابل محاسبه هستند (Zoback, M., 2010):

$$v = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (1)$$

$$E_{dyn} = \frac{pV_s^2(3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (2)$$

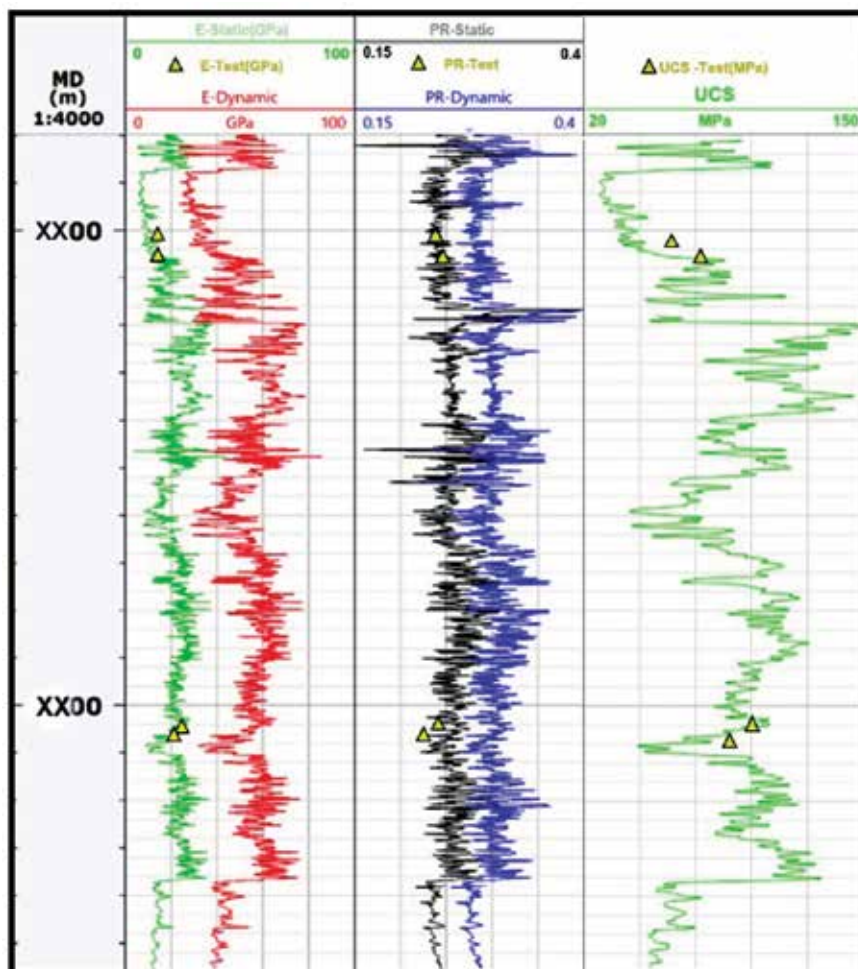
در این روابط V_s و V_p به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی برحسب $\text{ft}/\mu\text{s}$ و چگالی (ρ) برحسب gr/cm هستند. این پارامترها سپس از طریق روابط تجربی و داده‌های مغزه به پارامترهای استاتیک تبدیل می‌شوند. در این مطالعه پارامترهای الاستیک سنگ، شامل مدول یانگ ابتدا با استفاده از نگاره‌های چاه، شامل سرعت

1. Repeat Formation Tester

2. Formation Integrity Test

انتخاب پهنه مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی در سازندهای ایلام و سروک ...

- $E_{sta} = 0.414 E_{dyn} - 1.0593$ (۳) امواج برشی و فشاری، و چگالی با استفاده از روابط ۱ و ۲ به صورت دینامیکی برآورد شده‌اند. سپس با استفاده از رابطه ۳ که برای یکی از میداین کربناته در جنوب غربی ایران استخراج شده است، به مقادیر استاتیک تبدیل شده است (Fjaer et al. 2008) (شکل ۲).
- همچنین مقادیر مدول یانگ دینامیک با استفاده از رابطه (۴) به مقادیر استاتیک تبدیل شده‌اند (Fjaer et al. 2008).
- $v_{sta} = 0.7 v_{dyn}$ (۴)



شکل ۲. مدول یانگ و ضریب پواسون به صورت مقادیر دینامیک و استاتیک به همراه نتایج آزمون‌ها

همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است مقادیر استاتیک محاسبه شده از روابط تجربی انطباق مناسبی با نتایج آزمون‌های مکانیک سنگی مغزه نشان می‌دهد

مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ و چقرمگی شکست

مقاومت فشاری تک‌محوری، به‌عنوان بیشترین تنش که نمونه سنگی تحت تنش محوری بدون محدودیت جانبی، می‌تواند تحمل کند، شناخته می‌شود. این پارامتر از آزمون آزمایشگاهی نمونه‌های سنگی حاصل از مغزه چاه به دست می‌آید. از آنجایی که مغزه‌های چاه کمیاب هستند

و آزمون‌های آزمایشگاهی گران قیمت می‌باشند و همچنین نتایج این آزمون‌های گسسته و به‌صورت نقطه‌ای می‌باشند بهتر است با استفاده از روابط تجربی این پارامتر برآورد شود. برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوره روابط بسیاری وجود دارد که هرکدام از این روابط مطابق با شرایط سازندهایی که آزمایش روی مغزه آن‌ها انجام شده توسعه داده شده‌اند. در این مطالعه از رابطه ۵ که برای مخازن نفتی جنوبی ایران توسعه داده شده است، استفاده می‌شود (شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۳):

خوشه‌بندی و تعیین پهنه‌های مکانیک سنگی

خوشه‌بندی سلسله مراتبی روشی برای آنالیز خوشه‌ای است که به دنبال ایجاد سلسله مراتبی از خوشه‌ها است. از آن برای گروه‌بندی اشیاء مشابه استفاده می‌شود، جایی که هر خوشه از خوشه‌های دیگر متمایز است و اشیاء درون هر خوشه به‌طور کلی شبیه به یکدیگر هستند. دو نوع اصلی خوشه‌بندی سلسله مراتبی وجود دارد: تجمیعی و تقسیمی. خوشه‌بندی تجمیعی با در نظر گرفتن هر مشاهده به‌عنوان یک خوشه جداگانه شروع می‌شود و سپس دو خوشه مشابه را به‌طور مکرر ادغام می‌کند تا زمانی که همه خوشه‌ها با هم ادغام شوند. خوشه‌بندی تقسیمی با همه مشاهدات در یک خوشه شروع می‌شود و سپس با حرکت به سمت پایین سلسله مراتب آن‌ها را به‌صورت بازگشتی جدا می‌کند. برای انجام خوشه‌بندی، پس از آماده کردن داده‌های لازم، روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی برای تعیین خوشه‌های بهینه اعمال می‌شود. برای این منظور پس از انتخاب داده‌های ورودی با استفاده از روش اقلیدوسی فاصله بین زوج داده‌ها با همدیگر محاسبه می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از الگوریتم‌های مختلف و فاصله محاسبه شده بین زوج داده‌ها در مرحله قبلی، زوج‌ها به همدیگر ارتباط داده شدند. در ادامه درخت خوشه‌ای برای داده‌های مورد مطالعه تهیه می‌شود و با استفاده از آن، شماره تعداد خوشه‌های بهینه مشخص می‌شود و هر دسته داده به یک خوشه با ویژگی‌های مشخص اختصاص داده می‌شود (Kalthori et al., 2024). برای تعیین پهنه‌های مکانیک سنگی پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول یانگ، چقرمگی شکست، ضریب پواسون و اندیس شکنندگی سنگ به‌عنوان متغیرهای ورودی انتخاب شده است (شکل ۴). بر روی این داده‌ها روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی اعمال شده است و در ادامه درخت خوشه‌ای برای داده‌های مورد مطالعه چاه تهیه شده است (شکل ۳). با استفاده از درخت خوشه‌ای، شماره تعداد گونه‌های سنگی بهینه مشخص شد. شش

$$UCS = 2.28E_{sta} + 7.3 \quad (5)$$

در این رابطه E_{sta} مدول یانگ استاتیک برحسب GPa می‌باشد. مقادیر محاسبه شده با استفاده از این رابطه و همچنین نتایج تست‌های مکانیک سنگی در ترک سوم شکل ۲ آورده شده است. مقادیر برآورد شده با استفاده از این رابطه انطباق به نسبت خوبی را نتایج تست‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

چقرمگی شکست^۱ و اندیس شکنندگی^۲ سنگ

چقرمگی شکست توانایی مقاومت سنگ در برابر گسترش شکستگی، از شکستگی‌های پیشین در سنگ است. مقادیر بالای چقرمگی شکست نشان‌دهنده فشار بیشتر برای گسترش شکستگی در سنگ است و برعکس. در طراحی شکاف هیدرولیکی پارامتر چقرمگی شکست اهمیت بالایی دارد زیرا گسترش شکاف را کنترل می‌کند. رابطه زیر برای محاسبه این پارامتر توسعه داده شده است (Jin, X. et al, 2014):

$$K_{IC} = -1.68 + (0.65 * V_p) \quad (6)$$

که در این رابطه V_p سرعت موج فشاری در سنگ و K_{IC} چقرمگی شکست برحسب $MPa.m^{1/2}$ می‌باشد.

اندیس شکنندگی^۳ (BI) یک پارامتر حیاتی است که در شکاف هیدرولیکی برای مشخص کردن رژیم تغییر شکل سنگ استفاده می‌شود، که محدوده‌ای از ترد خالص (شکننده) تا شکل‌پذیر (نرم) را پوشش می‌دهد. مدل‌های مختلفی برای تعیین کمیت BI بر اساس ویژگی‌های سنگ مانند کانی‌شناسی، پارامترهای الاستیک یا داده‌های تنش- کرنش توسعه یافته‌اند. هدف این مدل‌ها بهینه‌سازی BI با کنترل شرایط زمین‌شناسی و تزریقی است (Jin et al., 2014, Huang et al., 2015, Meng et al., 2015). برای محاسبه اندیس شکنندگی در این مطالعه از رابطه ۷ استفاده شده است:

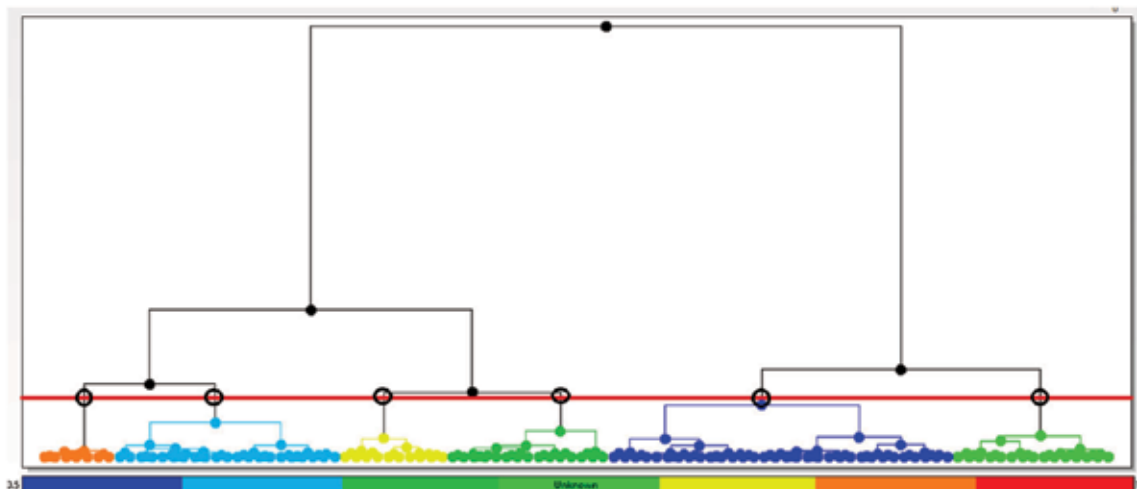
$$BI = \frac{UCS - \sigma_t}{UCS + \sigma_t} \quad (7)$$

که در آن UCS مقاومت فشاری تک‌محوری، و σ_t مقاومت کششی سنگ می‌باشد.

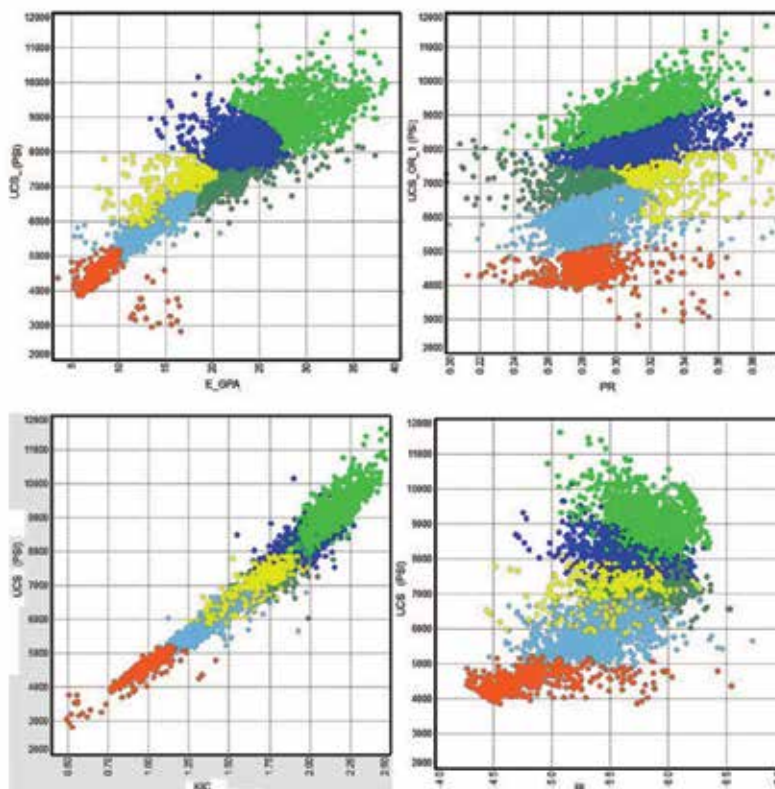
1. Fracture Toughness
2. Brittleness Index
3. Brittleness Index

انتخاب پهنه مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی در سازندهای ایلام و سروک ...

خوشه به عنوان تعداد خوشه‌های بهینه انتخاب شده است. مرحله آخر خوشه‌بندی با تعیین حد برش و انتخاب تعداد خوشه‌ها (شش خوشه بهینه در این مطالعه) انجام گرفت. پس از مشخص شدن گونه‌های سنگی، با استفاده از رسم گونه‌های سنگی در برابر عمق، چگونگی تغییرات بر اساس عمق مشخص می‌شود و امکان پهنه‌بندی مکانیک سنگی فراهم شد. پس از مشخص شدن پهنه‌های مکانیک سنگی، با بررسی خواص مکانیکی هر پهنه از لحاظ پارامترهای مکانیک سنگی، پهنه‌های با مقاومت بیشتر و پهنه‌های ضعیف‌تر مشخص می‌شوند و تصمیم‌گیری برای انتخاب پهنه مناسب انجام شد.



شکل ۳. درخت خوشه‌ای برای متغیرهای انتخاب شده به عنوان ورودی تعیین گونه‌های سنگی در چاه مورد مطالعه

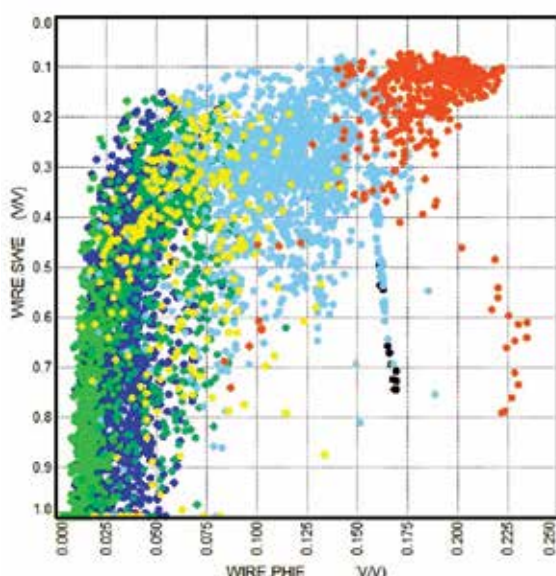


شکل ۴. رسم دو بعدی تعدادی از متغیرهای ورودی خوشه‌بندی

جدول ۲ مقادیر میانگین برای هر یک از پارامترهای انتخابی در شش خوشه را به تفکیک نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول ۲ مشخص است، کمترین مقاومت سنگ مربوط به خوشه شش و سپس خوشه دو می‌باشد که کمترین میزان مدول یانگ و مقاومت فشاری تک‌محوری را دارند و بیشترین مقاومت مربوط به خوشه سه و سپس خوشه یک می‌باشد، که بیشترین میزان مدول یانگ و مقاومت فشاری تک‌محوری را دارند.

جدول ۲. پارامترهای مکانیک سنگی استفاده شده در خوشه‌بندی، و میانگین هر پارامتر در خوشه‌های مختلف

Name	۱	۲	۳	۴	۵	۶
Color						
Poisson Ratio (Static)	۰/۳۰۴۰	۰/۲۸۴۸	۰/۳۲۲۹	۰/۲۹۷۲	۰/۳۲۵۵	۰/۲۸۴۲
Young's Modulus (Static)	۲۵/۵۶	۱۳/۶۱	۲۵/۱۲	۱۸/۸۷	۱۵/۸۷	۸/۳۱
BI	۵/۸۵۸۰	۵/۳۱۸۲	۵/۶۰۶۰	۵/۷۳۵۱	۵/۴۵۶۳	۴/۷۱۷۰
KIC	۱/۹۷۹۳	۱/۳۴۶۴	۲/۱۴۰۹	۱/۶۶۵۲	۱/۶۷۳۲	۰/۹۸۵۹
UCS	۵۷/۰۵	۴۰/۳۴	۶۲/۴۷	۴۷/۸۰	۴۸/۲۷	۳۲/۱۲



شکل ۵. نمودار اشباع آب-تخلخل با لحاظ خوشه‌های تعیین شده

فشار منفذی

در این مطالعه برای تخمین فشار منفذی در چاه‌های مورد مطالعه از روش گرادیان سیال استفاده شده است. در این روش با در اختیار داشتن مقادیر فشار مبنا و گرادیان فشار آب، نفت و یا گاز از طریق رابطه زیر می‌توان فشار منفذی را محاسبه نمود.

$$P_r = P_1 + \rho_f g (Z_r - Z_1) \quad (۸)$$

در این رابطه P_1 فشار سیال سازند در عمق Z_1 و P_2 فشار سیال در عمق Z_2 و ρ_f چگالی سیال و g شتاب جاذبه

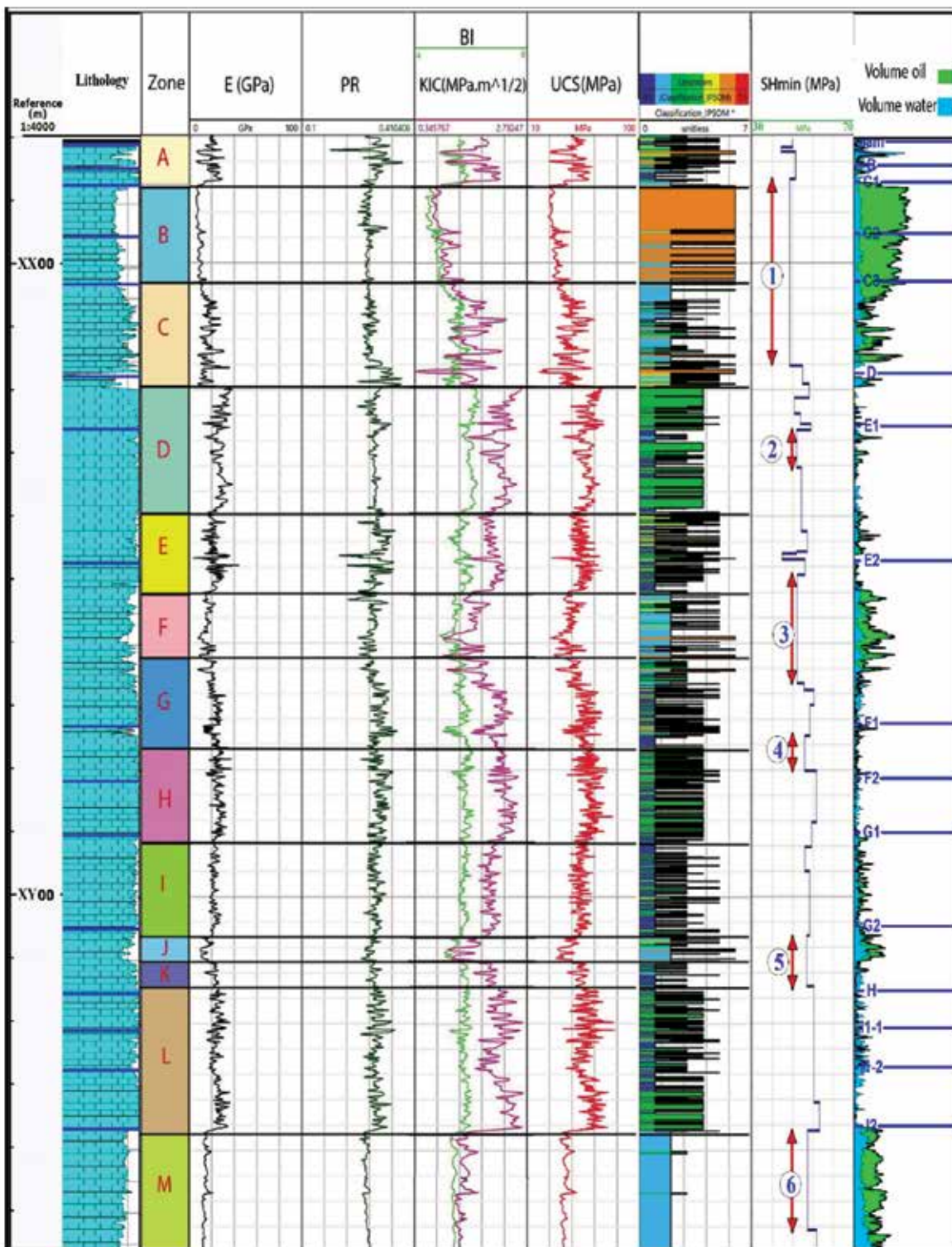
در شکل ۶ گونه‌های مکانیکی به همراه پارامترهای مکانیک سنگی استفاده شده، نشان داده شده است. بر اساس این خوشه‌بندی بازه مورد مطالعه به ۱۳ پهنه بخش شده است. که از A تا M نام‌گذاری شده‌اند. از میان این پهنه‌ها پنج پهنه J، F، C، B و M از خوشه‌های دو و شش تشکیل شده‌اند که دارای کمترین شاخص‌های مقاومتی سنگ هستند و همچنین همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده است وجود هیدروکربن در این پهنه‌ها، انجام عملیات شکاف هیدرولیکی در این پهنه‌ها را توجیه‌پذیر می‌کند.

از طرفی بررسی گونه‌های مکانیک سنگی از لحاظ تخلخل و تراوایی اهمیت بسزایی در انتخاب پهنه‌های کاندید دارد. ترسیم تخلخل-تراوایی با گونه‌های مکانیک سنگی در شکل ۵ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که خوشه‌های با کمترین میزان پارامترهای مقاومتی که شامل خوشه‌های شش و دو می‌شوند بیشترین میزان تخلخل و تراوایی را دارند که از لحاظ دانش مکانیک سنگ منطقی به نظر می‌رسد چرا که این دو خوشه کمترین میزان پارامترهای مقاومتی سنگ را دارند. خوشه‌های دو، پنج از لحاظ وضعیت تخلخل و اشباع‌شدگی آب مناسب هستند چرا که در خوشه شش تخلخل به صورت طبیعی بالاست.

در ادامه به محاسبه مقادیر تنش‌های اصلی و تعیین جهت‌یابی تنش‌های افقی پرداخته می‌شود.

انتخاب پهنه مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی در سازندهای ایلام و سروک ...

زمین است. این رابطه مقدار گرادیان نفت برابر با ۰/۳۵ psi/ft در نظر گرفته شده است (شکل ۷).
 با استفاده از مقادیر تست چاه RFT و با استفاده از رابطه ۸ فشار منفذی در چاه‌ها تخمین زده شده است. در



شکل ۶. مقادیر پارامترهای مکانیک سنگی، گونه‌های سنگی و پهنه‌های تعیین شده برای چاه مورد مطالعه

$$\sigma_h = \frac{\vartheta}{1-\vartheta}(\sigma_v - \alpha\sigma_v) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{(1-\vartheta^2)}(\varepsilon_x + \vartheta\varepsilon_y) \quad (10)$$

$$\sigma_H = \frac{\vartheta}{1-\vartheta}(\sigma_v - \alpha\sigma_v) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{(1-\vartheta^2)}(\varepsilon_y + \vartheta\varepsilon_x) \quad (11)$$

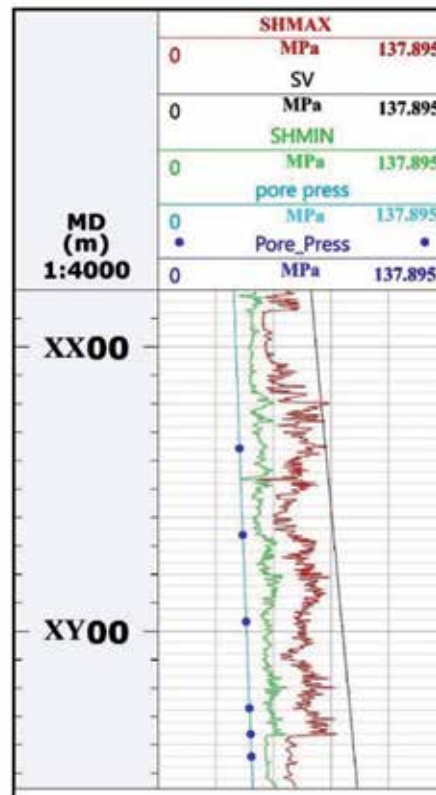
در این روابط ϑ ضریب پواسون، α ضریب بایوت، P_p فشار منفذی و σ_v تنش عمودی برحسب MPa، E_{sta} مدول الاستیسیته استاتیک برحسب GPa و ε_x ، ε_y به ترتیب کرنش نکتونیکی در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر است. مقادیر تنش‌های افقی و قائم در چاه مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است.

جهت تنش‌های افقی

یکی از راه‌های تعیین جهت تنش‌های افقی، استفاده از شکستگی‌های برشی و کششی دیواره چاه است. شکستگی برشی دیواره چاه قائم در راستای تنش افقی حداقل اتفاق می‌افتد. با حفر یک چاه قائم باعث می‌شود تا مسیرهای تنش در جهت‌های موازی و عمود بر دیواره چاه دچار تغییر شده و در اطراف چاه تمرکز تنش ایجاد شود. لذا وقوع شکست برشی در راستای تنش افقی مینیمم محتمل‌تر از راستای تنش افقی ماکسیمم است (Zoback, 2010).

ابزارهای متفاوتی برای تعیین جهت تنش‌های اصلی وجود دارد که در این میان نگارهای تصویری و کالپر چند بازویی نقش به سزایی دارند. بهترین روش برای تشخیص شکستگی‌های چاه‌نگارهای تصویری هستند. این نگارها عمق بررسی بسیار پایینی دارند. در گل حفاری پایه آبی از FMI و در گل‌های پایه روغنی از OBMI^۱ و UBI^۲ استفاده می‌شود، که به طور کلی OBMI برای تعیین شیب ساختاری و ساختارهای رسوبی و UBI برای تعیین شکستگی‌ها مناسب است (Schulumberger, 2003).

در چاه مورد مطالعه نگار تصویری مطابق شکل ۷ در سازند سروک موجود است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در این چاه تن‌ها یک شکستگی برشی



شکل ۷. پروفیل فشار منفذی و مقادیر نتایج تست RFT در چاه مورد مطالعه

مقدار و جهت تنش

تنش قائم

تنش عمودی در هر نقطه از چاه معادل وزن روباره می‌باشد که بر اساس نگار چگالی و با استفاده از انتگرال‌گیری دانسیته سنگ از سطح تا عمق مورد نظر مطابق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z) g dz \approx \bar{\rho} g z \quad (9)$$

در این رابطه σ_v تنش عمودی، $\bar{\rho}$ چگالی متوسط، g ثابت گرانش و z عمق از سطح زمین است. وضعیت تنش قائم در چاه مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است.

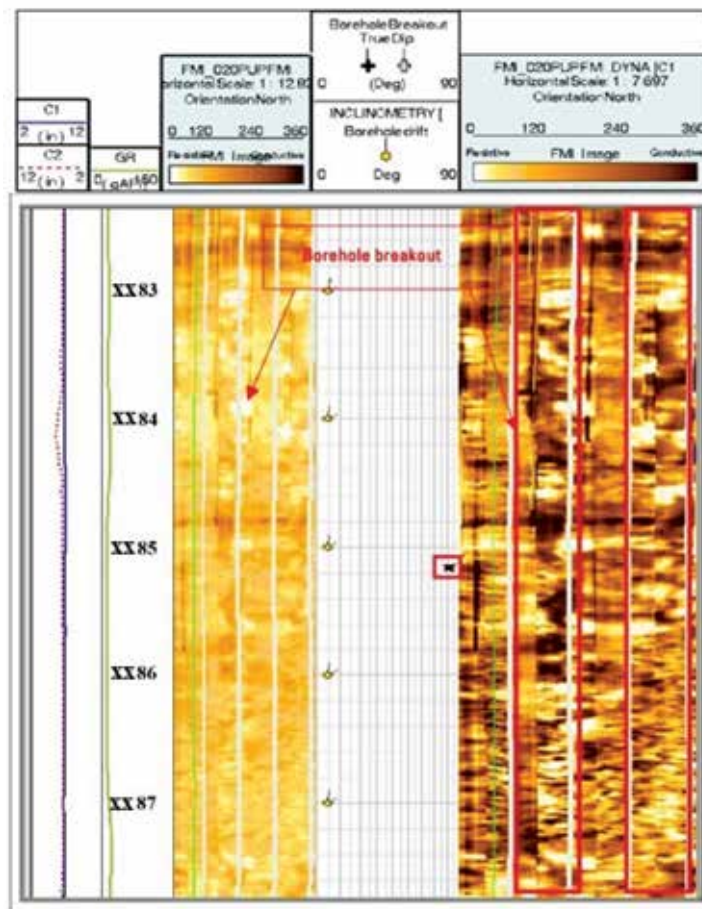
تنش‌های افقی

روش‌های تخمین تنش به دلیل کم‌هزینه بودن و سرعت در محاسبه مورد استقبال محققین قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌های متداول برای تخمین تنش‌های افقی استفاده از روابط پوروالاستیک است (Archer and Rasouli 2012):

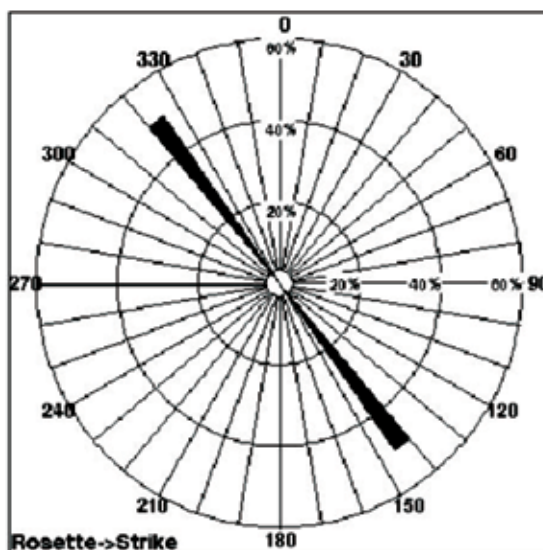
1. Oil-based microimager
2. Ultrasonic Borehole Imager

انتخاب پهنه مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی در سازندهای ایلام و سروک ...

مشخص رخ داده است. با توجه به این شکل امتداد این شکستگی N37W بوده (شکل ۸) که مطابق با جهت تنش افقی مینیمم است. با توجه به عمود بودن جهت تنش افقی ماکسیمم در چاه مورد مطالعه در راستای N 50-70 E خواهد بود.



شکل ۸. نمایش شکستگی برشی در چاه



شکل ۹. امتداد شکستگی برشی رخ داده (شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب، ۱۳۸۹)

موانع تنش^۱

قابل قبول باشند. بر این اساس پهنه‌های تنش دو و چهار به دلیل اینکه در پهنه‌های مکانیک سنگی مقاوم D و G واقع شده‌اند، حذف می‌شوند. در مطالعات جامع شکافت هیدرولیکی سنگ مخزن پارامترهای مکانیک سنگی، تنش‌های موجود، ویژگی‌های پتروفیزیکی از قبیل تخلخل، اشباع‌شدگی، تراوایی نیز جهت انتخاب پهنه مناسب مخزن باید مورد بررسی قرار گیرد. اگر در یک بازه مخزنی تخلخل بالا (بالتر از ۱۸ درصد) وجود داشته باشد و تراوایی نیز بیشتر از ۱۰ میلی داری باشد زهکشی و تخلیه مخزن به‌صورت طبیعی اتفاق می‌افتد و دیگر نیازی به عملیات شکافت هیدرولیکی نخواهد داشت. از طرف دیگر، اگر میزان تخلخل کمتر از پنج درصد باشد و تراوایی هم کمتر از یک میلی داری باشد میزان ذخیره مخزن در حدی نخواهد بود که عملیات را اقتصادی کند (Usman et al., 2010). پهنه‌هایی که تولید طبیعی آن‌ها از نظر اقتصادی بسیار قابل توجه است و همچنین پهنه‌هایی که اشباع آب آن‌ها بالاست، جز اولویت‌های آخر قرار گرفته‌اند (شکل ۶). برای بخش بالایی پهنه تنش یک (معادل پهنه مکانیکی B) همان‌طور که از شکل مشخص است تخلخل از ۱۵ درصد بیشتر است و بنابراین این بخش، برای انجام عملیات شکافت هیدرولیکی مناسب نیست. بنابراین تن‌ها پهنه‌های تنش سه، پنج و شش به نظر برای انجام عملیات مناسب به نظر می‌رسند.^۱

نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج و پهنه‌های تعیین شده برای چاه مورد مطالعه نتایج زیر به‌دست‌آمده است:

- پهنه‌های M و B نسبت به پهنه‌های دیگر یکنواخت‌تر هستند و پارامترهای مکانیک سنگی کمترین تغییرات را نسبت به سایر پهنه‌ها دارند.
- پهنه‌های H، G، E، D، و L بیشتر از خوشه‌های یک و سه که مقاوم‌ترین خوشه‌ها هستند تشکیل شده‌اند و دارای مقاومت بالایی می‌باشند. این پهنه‌ها دارای بالاترین مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول

یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در ایجاد و رشد شکافت تنش افقی مینیمم می‌باشد که شکافت هیدرولیکی در راستای این تنش رشد خواهد کرد. در صورتی که در پروفیل تنش افقی مینیمم پهنه‌ی وجود داشته باشد که میزان تنش در آن پهنه از بخش‌های بالایی و پایینی خود کمتر باشد، به بخش‌های با تنش بیشتر موانع تنشی گفته می‌شود. موانع تنشی با محدود کردن ارتفاع شکافت و افزایش عرض، نقش مهمی در شکافت هیدرولیکی ایفا می‌کنند و بر مهار شکافت در سازندهای لایه‌ای تأثیر می‌گذارند (Wu, et al., 2022). مانع تنشی بر افزایش تدریجی فشار سیال تزریقی تأثیرگذار است که خود بر رفتار رشد شکافت مؤثر است (Xu, et al., 2019). بنابراین، موانع تنشی در درک و مدیریت فرآیندهای شکافت هیدرولیکی یکی از پارامترهای تأثیرگذار است. از طرفی رشد عمودی کنترل نشده شکافت ممکن است منجر به نفوذ شکافت به پهنه آبدار مخزن شود. در این مطالعه پروفیل تنش استخراج شده در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است پهنه‌هایی که توسط موانع تنشی محدود شده‌اند با شماره از یک تا شش نشان داده شده‌اند.

بحث

یکی از کلیدی‌ترین پارامترها در تعیین پهنه مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی، اندازه تنش افقی مینیمم می‌باشد. اهمیت این پارامتر در مهار رشد عمودی شکافت است، و پهنه‌هایی حائز اهمیت هستند که میزان تنش در آن‌ها پایین‌تر باشد و توسط پهنه‌های با تنش بالاتر (موانع تنشی) احاطه شده باشند. به همین منظور شش پهنه تنشی در پروفیل تنش افقی مینیمم چاه مورد مطالعه شناسایی شده است (شکل ۶). که از میان آنها، پهنه‌هایی که از لحاظ شرایط مقاومتی سنگ، و مخزنی، وضعیت مناسبی داشته باشند، انتخاب می‌شوند. ترجیح بر این است که این پهنه‌ها بیشتر از خوشه‌های شش و دو تشکیل شده باشند (مقاومت مکانیک سنگی کمتر)، اشباع هیدروکربن داشته باشند و همچنین از لحاظ مقادیر تخلخل و تراوایی در محدوده

1. Stress Barriers

منابع

- یانگ و چقرمگی شکست هستند.
- پهنه‌های J، F، C، B و M بیشتر از خوشه‌های دو و شش تشکیل شده‌اند و دارای کمترین مقاومت هستند. این پهنه‌ها دارای کمترین مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول یانگ و چقرمگی شکست هستند. همچنین این پهنه‌ها حاوی هیدروکربن می‌باشند.
 - پهنه‌های F، و J که در دسته پهنه‌های با کمترین مقاومت هستند، هر کدام توسط دو پهنه با مقاومت یا تنش بالاتر در بالا و پایین احاطه شده‌اند که پهنه‌های مقاوم بالا و پایین به‌عنوان یک سد در برابر رشد عمودی شکاف عمل می‌کند.
 - با تقریب به نسبت خوب پهنه‌های مکانیک سنگی B و C معادل پهنه تنش‌ی یک، پهنه F معادل پهنه تنش‌ی سه، پهنه مکانیک سنگی J معادل پهنه تنش‌ی پنج، پهنه مکانیک سنگی M معادل پهنه تنش‌ی شش می‌باشند که این پهنه‌های تنش‌ی با موانع تنش‌ی احاطه شده‌اند که به‌عنوان سد در برابر رشد عمودی شکاف می‌تواند عمل کند.
 - با لحاظ کردن محدودیت اشباع آب و تخلخل، بهترین پهنه‌ها به ترتیب پهنه تنش‌ی شش معادل پهنه مکانیک سنگی M و پهنه مخزنی I2، پهنه تنش‌ی سه که کم‌وبیش معادل پهنه مکانیک سنگی F و پهنه مخزنی E2 است، پهنه تنش‌ی (5) که کم‌وبیش معادل پهنه مکانیک سنگی J و K پهنه مخزنی G2 است و بخش پایینی پهنه تنش‌ی یک که معادل پهنه مکانیک سنگی C و پهنه مخزنی C3 است مناسب شکافت هیدرولیکی هستند (بخش بالایی پهنه تنش‌ی یک که معادل پهنه مکانیک سنگی B و پهنه مخزنی C1 و C2 می‌باشد تخلخل ۱۸ درصد دارد و تولید آن به‌صورت طبیعی بالاست).
 - بهترین جهت‌یابی برای مشبک‌کاری چاه حدود N50E می‌باشد که راستای تقریبی تنش افقی بیشینه می‌باشد.
 - شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۳. انجام آزمایش نشت و نشت گسترده در چاه XX، ایران، گزارش شماره پ-۷۹۹۱.
 - شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۸۹. تفسیر نمودار تصویری، گزارش شماره پ-۶۷۵۶.
 - Archer, S. and Rasouli, V., 2012. A log based analysis to estimate mechanical properties and in-situ stresses in a shale gas well in North Perth Basin. *Petroleum and Mineral Resources*, 21, 122-135.
 - Economides, M.J. and Nolte, K.G., 1989. *Reservoir stimulation*, 2, 6-10.
 - Fjaer, E., Holt, R.M., Horsrud, P. and Raaen, A.M., 2008. *Petroleum related rock mechanics*, Vol. 53, Elsevier.
 - Hibbeler, J. and Rae, P., 2005. *Simplifying hydraulic fracturing-theory and practice*. SPE-97311.
 - Huang X.R., Huang J.P., Li, Z.C., Yang Q.Y., Sun Q.X., Cu, W., 2015. Brittleness index and seismic rock physics model for anisotropic tight-oil sandstone reservoirs. *Applied Geophysics*, 12, 11-22.
 - Jahandideh, A. and Jafarpour, B., 2016. Optimization of hydraulic fracturing design under spatially variable shale fracability. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 138, 174-188.
 - James G. A. and Wynd J. G., 1965. Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area, AAPG, Bulletin, 49, 2182-2245.
 - Jin X., Shah S., Roegiers J.C. and Hou B., 2014. Breakdown pressure determination A fracture mechanics approach. USA: SPE.
 - 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, p.212826.
- Legarth, B., Huenges, E. and Zimmermann, G., 2005. Hydraulic fracturing in a sedimentary geothermal reservoir: Results and implications. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42,77, 1028-1041.
 - Meng F., Zhou H., Zhang C., Xu R. and Lu J., 2015. Evaluation methodology of brittleness of rock based on post-peak stress-strain curves. *Rock. Mech. Rock. Eng.*, 48 1787-1805.
 - Schlumberger., 2003. Using borehole imagery to reveal key reservoir features. In *Reservoir Optimization Conference*. Tehran., Iran.
 - Usman, U., Marino, D. and Soelistijono, M., 2010. Study On Productivity Improvement Of Low Permeability Gas Reservoir By Hydraulic Fracturing. *Scientific Contributions Oil and Gas*, 33(2), 120-128.
 - Warpinski, N.R., Clark, J.A., Schmidt, R.A. and Huddle, C.W., 1982. Laboratory investigation on the effect of in-situ stresses on hydraulic fracture containment. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 22(03), .333-340.
 - Willis, R.B., Fontaine, J., Paugh, L. and Griffin, L., 2005. Geology and geometry: A review of factors affecting the effectiveness of hydraulic fractures. *SPE-97993*.
 - Wright, C.A., Weijers, L., Davis, E.J. and Mayerhofer, M., 1999. Understanding hydraulic fracture growth: Tricky but not hopeless. *SPE-56724*
 - Wu, B., Wei, X., Wang, W., Li, J., Liu, T. and Wang, X., 2022. Effect of stress and material barriers on hydraulic fracture height containment in layered formations. *Environmental Earth Sciences*, 81,1, 255.
 - Xu, W., Prioul, R., Berard, T., Weng, X. and Kresse, O., 2019. Barriers to hydraulic fracture height growth: A new model for sliding interfaces. *SPE-194327*.
 - Zoback, M.D., 2010. *Reservoir geomechanics*. Cambridge university press.

زیست‌چینه‌نگاری نهشته‌های کرتاسه براساس نانوفسیل‌های آهکی در برش کوهبنان (شمال غرب کرمان، حوضه رسوبی ایران مرکزی)

مرضیه نطقی مقدم^(*)

۱. دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

چکیده

برای مطالعه میکروبیواسراتریگرافی نهشته‌های کرتاسه ایران مرکزی، برش کوهبنان شمال غرب کرمان انتخاب شده است. ضخامت بررسی‌شده نهشته‌های کرتاسه در این برش ۳۲۶ متر می‌باشد و بیشتر شامل مارن و سنگ‌آهک است. مطالعات انجام شده منجر به شناسایی ۱۷ جنس و ۳۸ گونه از نانوفسیل‌های آهکی شد. براساس نانوفسیل‌های آهکی شاخص، این برش به چهار زیست‌پهنه استاندارد *Chiastozygus* *litterarius zone*، *Prediscosphaera columnata zone*، *Eiffellithus turriseiffelii zone* و لبه پایینی *Microrhabdulus decoratus zone* تفکیک شد. بر مبنای این زیست‌پهنه‌ها، نهشته‌های مورد بررسی در این برش، بازه آپتین تا سنومانین پیشین را در بر می‌گیرند. اولین ظهور *Microrhabdulus decoratus* همراه با *Braarudosphaera bigelowii* در سنومانین و آخرین ظهور *Eiffellithus parvus*، *Lithraphidites alatus* و *Braarudosphaera africana* در سنومانین نشانگر عبور از کرتاسه پیشین و آغاز کرتاسه پسین در این برش است.

واژه‌های کلیدی: ایران مرکزی، زیست‌چینه‌نگاری، کرتاسه، کرمان، نانوفسیل‌های آهکی

مقدمه

شده و واحدهای تکتونیکی آن طی فرورانش و برخورد نهایی صفحه آفریقا-عربستان با ایران که از زمان مزوزوئیک آغاز شده، ایجاد شده‌اند (Reuter et al., 2009). پویایی این حوضه منجر شده تا ناهمسانی‌های ساختاری-رسوبی گسترده و نبودهای چینه‌نگاری مهمی را درون خود جای دهد و متشکل از چندین خردقاره باشد (آقاناتی، ۱۳۸۴).

فلات ایران از قطعات قاره‌ای متعددی تشکیل شده است که با گسل‌ها و زمین‌درزهای متعدد در کنار هم قرار گرفته‌اند (Nadimi, 2007). ایران مرکزی پیکره اصلی و میانی فلات ایران را تشکیل می‌دهد که در زمان‌های مزوزوئیک و سنوزوئیک به منطقه‌ای پرتحرک و پویا تبدیل

* نویسنده مرتبط: mehrankalhari@gmail.com

موقعیت برش و چینه‌شناسی

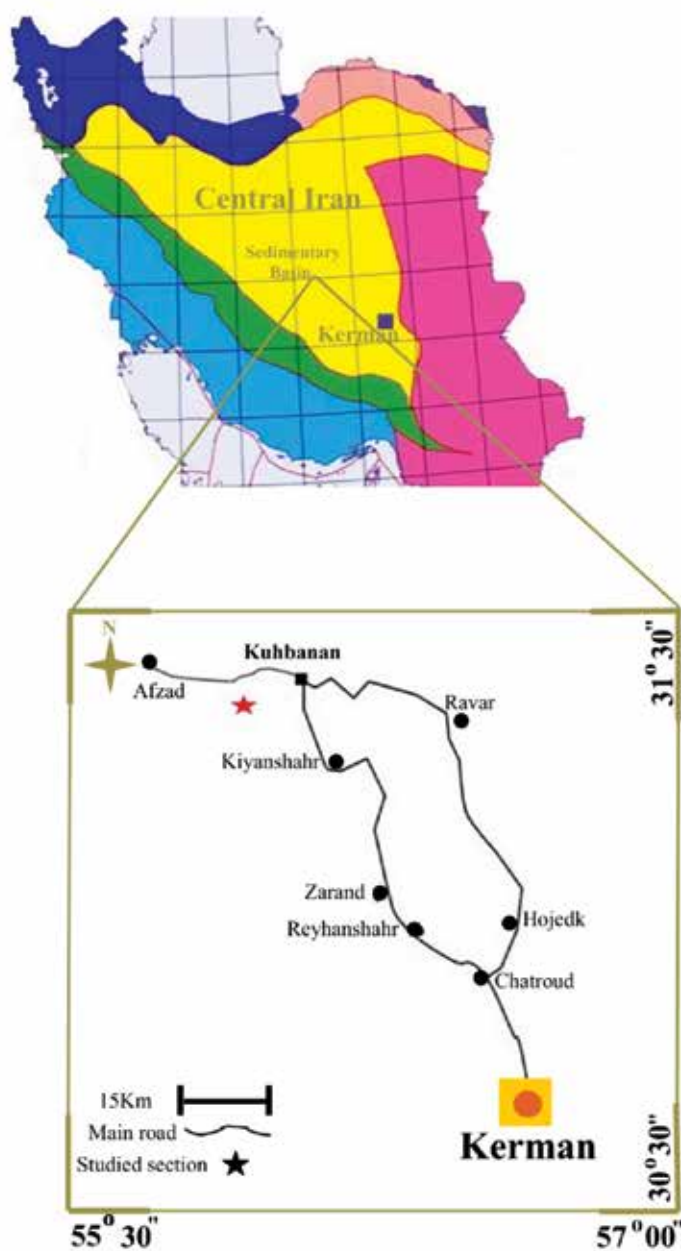
شهرستان کوهبنان در شمال غرب کرمان بخشی از حوضه رسوبی ایران مرکزی است که در غرب آن رخنمون مناسبی از نهشته‌های کرتاسه وجود دارد. نهشته‌های مذکور حاوی ماکروفسیل‌ها و میکروفسیل‌های متعدد هستند. برش کوهبنان دارای طول جغرافیایی $55^{\circ}52'8''$ شرقی و عرض جغرافیایی $31^{\circ}23'6''$ شمالی است. دسترسی به برش مذکور از طریق جاده آسفالت کرمان-کوهبنان و عبور از چترود، زرنده و کیانشهر و یا از مسیر هجدک و راور امکان‌پذیر است (شکل ۱). توالی نهشته‌های کرتاسه نمونه‌برداری شده در برش کوهبنان با ضخامت ۳۲۶ متر متشکل از واحد مارنی به ضخامت ۱۷۱ متر است. مارن‌های نمونه‌برداری شده به رنگ خاکستری مایل به سبز دیده شده، دارای بین‌لایه‌های شیل‌های آهکی است و به صورت هم‌شیب بر روی ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک قرار دارد. در ادامه ۱۲۰ متر سنگ‌آهک‌های قهوه‌ای تا مایل به خاکستری تیره نهشته شده است. سپس واحد مارن مایل به سبز با ضخامت کمتر و در حدود ۳۵ متر مشاهده می‌شود. مرز فوقانی توالی نمونه‌برداری شده، به صورت تدریجی و عادی با سنگ‌آهک‌های خاکستری تیره و ضخیم لایه است (شکل ۳).

روش مطالعه

برای مطالعه نهشته‌های کرتاسه ایران مرکزی در برش کوهبنان، تعداد ۱۰۷ نمونه در راستای عمود بر لایه و از عمق حدود ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متری و با فواصل سه متری برداشت شد. بعد از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه میکروفسیل، آماده‌سازی نمونه‌ها مبتنی بر روش اسمیراسلاید (Bown and Young, 1998) انجام شده و اسمیراسلایدها با میکروسکوپ نوری المپوس مدل BH2 و در دو نور PPL و XPL مطابق معمول مطالعات نانوفسیلی مانند سنماری و فروغی (۱۳۹۸) مطالعه شد. جنس و گونه‌های نانوفسیلی موجود عکس‌برداری شده و مانند نطقی‌مقدم و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از تعاریف پرچ نیلسون (Perch-Nielsen, 1985) و بون و یانگ (Bown, and Young, 1997) شناسایی شد (پلیت ۱).

ایران مرکزی در سیستم کوهزایی آلپ-همالیا با البرز و کپه‌داغ در شمال، کوه‌های شرق ایران در شرق و زاگرس و مکران در غرب و جنوب احاطه شده (Berberian, 2014) و به بلوک لوت، فرازمین شتری، فرونشست طبس، فرازمین کلمرد، بلوک پشت بادام، فروافتادگی بیاضه-بردسیر و بلوک یزد بخش می‌شود (Berberian and King, 1981).

در این حوضه رسوبی نهشته‌های شیلی و مارنی، سنگ‌آهکی، ماسه‌سنگی و کنگلومرایی کرتاسه مشابه با سایر حوضه‌های رسوبی از رخنمون مناسبی برخوردار است ولی به دلیل تاثیر فعالیت‌های تکتونیکی شدید، به صورت مختلف در نواحی جغرافیایی کوتاه نهشته شده و بدون نام‌های رسمی هستند. با این وجود به دلیل ضخامت مناسب لایه‌های کرتاسه در این حوضه رسوبی، از دیرباز مطالعه سنگ‌های کرتاسه پهنه ساختاری ایران مرکزی از دیدگاه چینه‌نگاری و فسیل‌شناسی، مورد توجه پژوهشگران دیرینه‌شناس بوده است. برخی از مطالعات انجام شده بر روی رسوبات کرتاسه ایران مرکزی در کرمان توسط شمیرانی و آنتیکی‌نژاد (۱۳۷۲)، اصغری و همکاران (۱۳۷۷)، خسروتهرانی و فاریابی (۱۳۸۲)، احمدی و همکاران (۱۳۸۸)، وزیری و همکاران (۱۳۸۵)، رامی (۱۳۸۷)، عرب (۱۳۸۹)، هوکریده و همکاران (Huckriede, et al., 1962) و دیمیتریویک (Dimitrijevic, 1973) ارائه شده است. علاوه بر آن تعداد کمی مطالعات نانوفسیلی نیز در کرمان از قبیل شه‌مرادی و همکاران (۱۴۰۱)، (Shahmoradi Fahreji, 2024) بر روی نهشته‌های مزوزوئیک و سنوزوئیک انجام شده است. به دلیل اهمیت بررسی دیرینه‌شناسی نانوفسیل‌های آهکی ایران و با توجه به تعیین سن نشدن نهشته‌های گستره کوهبنان با نانوفسیل‌های آهکی، بررسی دیرینه‌شناختی نهشته‌های منسوب به کرتاسه در این گستره انجام شده، ضمن معرفی جنس و گونه‌های نانوفسیلی، پهنه‌بندی زیستی و تعیین سن نهشته‌ها انجام می‌شود.



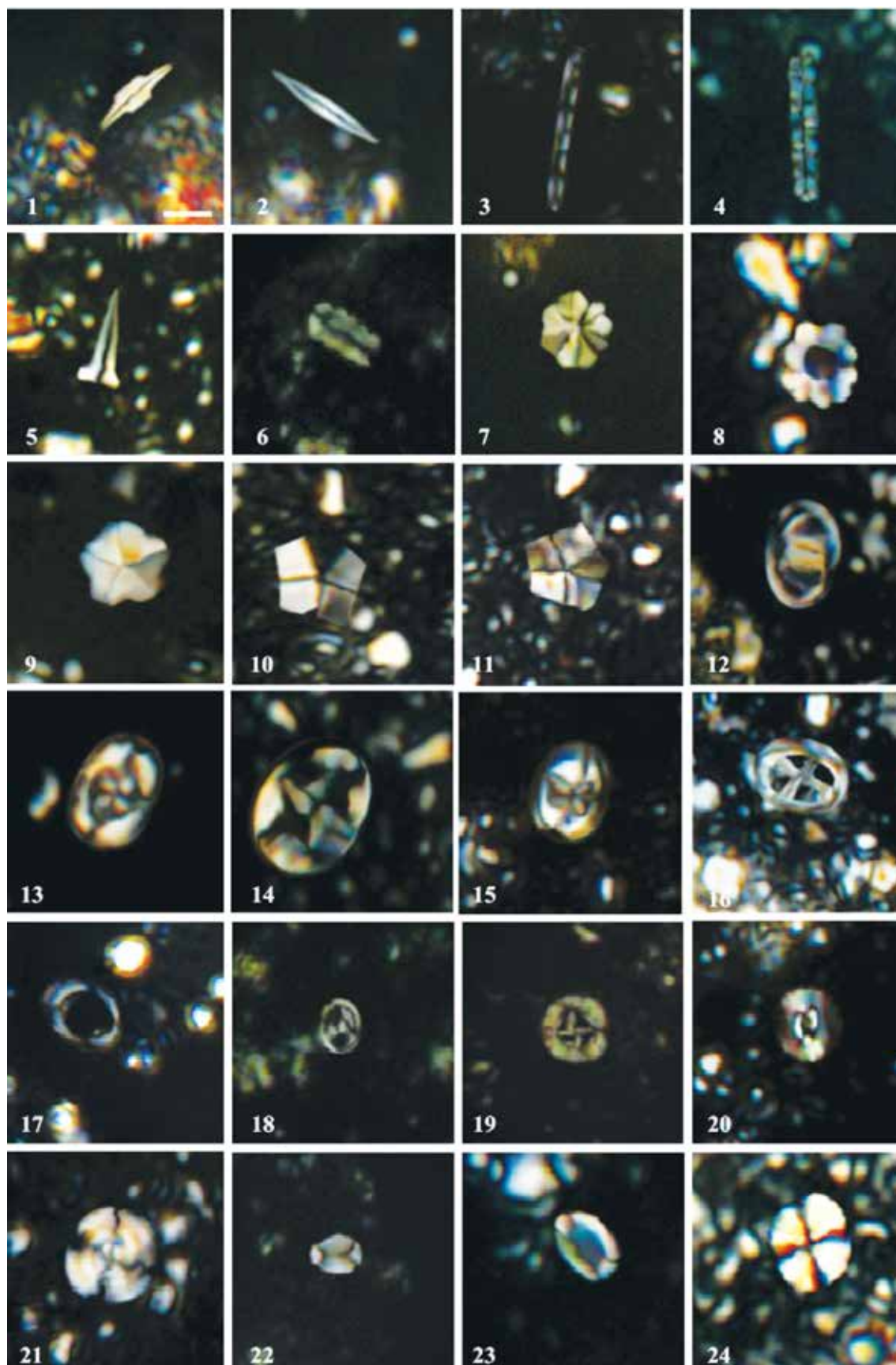
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به برش مورد مطالعه

بحث

حفظ‌شدگی و ترکیب گونه‌ای نانوفسیل‌های آهکی

سنماری (۱۴۰۰) مبتنی بر توضیحات راث (Roth, 1983) انحلال و دیاژنز را از عوامل تاثیرگذار بر روی فراوانی و مجموعه گونه‌های نانوفسیلی می‌داند. در صورت وجود عوامل مذکور در حوضه‌های رسوبی، گونه‌های نامقاوم و یا کم مقاوم نسبت به انحلال محکوم به حذف شدن بوده و در مقابل گونه‌های مقاوم در برابر انحلال و دیاژنز از فراوانی بیشتری

برخوردار می‌شوند. علاوه بر آن رشد ثانویه بلورهای کلسیت و انحلال که هر دو می‌تواند محصول دیاژنز باشد، حفظ‌شدگی نانوفسیل‌ها و ساختارهای ظریفشان را دستخوش تغییر کرده و شناسایی آن‌ها را با مشکل مواجه می‌سازد. در این مطالعه ۳۸ گونه از ۱۷ جنس نانوفسیلی شناسایی شد. به طور کلی حفظ‌شدگی نانوفسیل‌های آهکی در نمونه‌های آماده شده از سنگ‌آهک‌های توالی مورد مطالعه براساس توضیحات راث (Roth, 1984) ضعیف تا



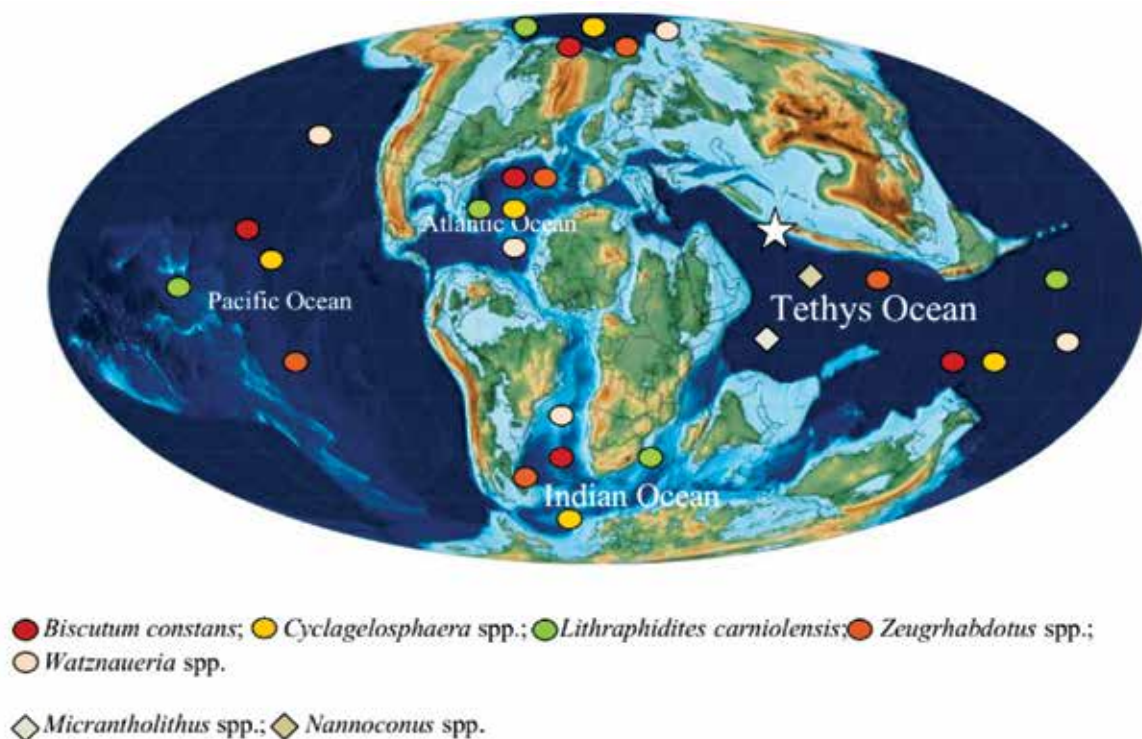
پلیت ۱. تصاویر نانوفسیل‌های آهکی شناسایی‌شده در برش کوهبنان (Scale bar: 5 μ m)

اسامی نانوفسیل‌های آهکی پلیت ۱. (K معرف نمونه مربوط به برش کوهبنان است)

- 1: *Lithraphidites pseudoquadratus* Crux, 1981 (K105)
- 2: *Lithraphidites carniolensis* Deflandre, 1963 (K63)
- 3: *Microrhabdulus decoratus* Deflandre, 1959 (K105)
- 4: *Microrhabdulus belgicus* Hay & Towe, 1963 (K92)
- 5: *Acuturris scotus* (Risatti, 1973) Wind & Wise in Wise & Wind, 1977 (K106)
- 6: *Lithraphidites bollii* (Thierstein, 1971) Thierstein, 1973 (K6)
- 7: *Assipetra terebrodentarius* (Applegate et al. in Covington & Wise, 1987) Rutledge & Bergen in Bergen, 1994 (K69)
- 8: *Eprolithus floralis* (Stradner, 1962) Stover, 1966 (K38)
- 9: *Micrantholithus obtusus* Stradner, 1963 (K11)
- 10: *Braarudosphaera bigelowii* (Gran & Braarud 1935) Deflandre, 1947 (K107)
- 11: *Braarudosphaera regularis* Black, 1973 (K27)
- 12: *Zeugrhabdotus bicrescenticus* (Stover, 1966) Burnett in Gale et al., 1996 (K31)
- 13: *Eiffellithus parvus* Watkins & Bergen, 2003 (K98)
- 14: *Eiffellithus turriseiffelii* (Deflandre in Deflandre & Fert, 1954) Reinhardt, 1965 (K94)
- 15: *Eiffellithus gorkae* Reinhardt, 1965 (K30)
- 16: *Chiastozygus litterarius* (Górka, 1957) Manivit, 1971 (K1)
- 17: *Manivitella pemmatoidea* (Deflandre in Manivit, 1965) Thierstein, 1971 (K5)
- 18: *Zeugrhabdotus erectus* (Deflandre in Deflandre & Fert, 1954) Reinhardt, 1965 (K17)
- 19: *Prediscosphaera columnata* (Stover, 1966) Perch-Nielsen, 1984 (K25)
- 20: *Biscutum constans* (Górka, 1957) Black in Black & Barnes, 1959 (K13)
- 21: *Watznaueria barnesiae* (Black in Black & Barnes, 1959) Perch-Nielsen, 1968 (K17)
- 22: *Assipetra infracretacea* (Thierstein, 1973) Roth, 1973 (K12)
- 23: *Repagulum parvidentatum* (Deflandre & Fert, 1954) Forchheimer, 1972 (K68)
- 24: *Cyclagelosphaera margerelii* Noël, 1965 (K54)

متوسط است. در این نمونه‌ها *Watznaueria barnesiae* spp. که مقاوم در برابر انحلال است به کرات دیده می‌شود و برعکس گونه‌های نامقاوم و با ساختارهای ظریف مانند *Biscutum constans* در تعداد کمی از نمونه‌ها مشاهده شده‌اند. در مارن‌های مورد بررسی، نانوفسیل‌های آهکی با حفظ‌شدگی به نسبت خوب مشاهده شد و تعداد گونه‌های دارای ساختارهای ناحیه مرکزی مانند حفرات، صلیب‌ها و پل‌های تغییرشکل یافته بسیار اندک است. در میان گونه‌های نانوفسیلی شناسایی شده در برش کوهبنان، گونه‌هایی از قبیل *Biscutum constans* (شکل ۲).

Lithraphidites، *Cyclagelosphaera* spp.، *Watznaueria* و *Zeugrhabdotus* spp. از نانوفسیل‌هایی هستند که پراکندگی جهانی دارند (Herrle, 2003 Premoli Silva et al., 1989) و در حوضه‌های رسوبی مختلف دیده می‌شوند. علاوه بر آن‌ها *Micrantholithus* spp. و *Nannoconus* spp. از نانوفسیل‌ها هستند که فقط از حوضه تتیس گزارش شده‌اند (Perch-Nielsen, 1985, 1979; Mutterlose, 1987) و در این مطالعه با حفظ‌شدگی خوبی مشاهده شدند (شکل ۲).



شکل ۲. پراکندگی پالئوژئوگرافی جنس و گونه‌های نانوفسیلی شناسایی شده برش مورد مطالعه در بازه زمانی کرتاسه
جنس و گونه‌های با پراکندگی جهانی ●؛ جنس و گونه‌های شاخص تتیس ◆

رخدادهای نانوفسیلی

محدوده ابتدای آلبین پیشین است و تا پایان توالی حضور این گونه مشاهده شد. حادثه‌های زیستی فوق از ابتدای توالی تا ۷۵ متری ثبت شدند و به دنبال آن در ۲۹۷ متری از قاعده، اولین ظهور *Eiffellithus turriseiffelii* ثبت شد و تا پایان توالی در برخی از نمونه‌ها حضور دارد. اولین ظهور گونه‌ی *Microrhabdulus decoratus* در ۳۲۲/۵ متری از قاعده

از اولین رویدادهای نانوفسیلی ثبت شده در این مطالعه، نخستین ظهور گونه‌ی *Chiastozygus litterarius* به همراه *Eprolithus floralis* است که مقارن با آپتین رخ می‌دهد. گونه‌های مذکور تا پایان توالی در تعدادی از نمونه‌های مطالعه شده ثبت شدند. رویداد زیستی بعدی با اولین ظهور گونه‌ی *Prediscosphaera columnata* مشاهده شد که در

زیست پهنه ۱: *Chiastozygus litterarius* zone (CC 7)

معادل با NC6 و NC7

زیست پهنه *Chiastozygus litterarius* توسط تیرستاین (Thierstein, 1971) و مانیویت و همکاران (Manivit, et al., 1977) از اولین ظهور گونه‌ی *Chiastozygus litterarius* تا اولین ظهور گونه‌ی *Prediscosphaera aera columnata* معرفی شده و دارای بازه زمانی آپتین و ابتدای آلبین پیشین می‌باشد (Perch-Nielsen, 1985). زیست پهنه CC7 با آخرین ظهور *Micrantholithus hoschulzii* به دو زیرپهنه CC7a و CC7b بخش می‌شود. مطابق مطالعات تیرستاین (Thierstein, 1976)، اولین ظهور *Eprolithus floralis* در آپتین پیشین و در محدوده این زیست پهنه رخ داده است.

زیست پهنه مذکور معادل با زیست پهنه NC6 (از اولین ظهور *Hayesites irregularis* تا اولین ظهور *Eprolithus floralis*) و NC7 (از اولین ظهور *Eprolithus floralis* تا اولین ظهور *Prediscosphaera columnata*) از پهنه‌بندی راث (Roth, 1987) و برالوور و همکاران (Bralower, et al., 1993, 1995) می‌باشد.

در این مطالعه اولین ظهور گونه‌ی *Chiastozygus litterarius* در نمونه شماره ۱ و اولین ظهور گونه‌ی *Prediscosphaera columnata* در نمونه شماره ۲۵ ثبت شد. از این رو ضخامت CC7 در برش مورد مطالعه، ۷۵ متر است. اولین ظهور *Hayesites irregularis* در این مطالعه ثبت نشد، بنابراین بخش پایینی زیست پهنه NC6 تعیین نشد ولی براساس اولین ظهور *Eprolithus floralis* در نمونه شماره ۷ بخش بالایی NC6 تعیین شد. علاوه بر آن اولین ظهور *Eprolithus floralis* و *Prediscosphaera columnata* به ترتیب در نمونه شماره ۷ و ۲۵ موید وجود زیست پهنه NC7 است.

زیست پهنه ۲: *Prediscosphaera columnata* zone (CC 8)

معادل با NC8 و NC9

زیست پهنه *Prediscosphaera columnata* با سن آلبین توسط تیرستاین (Thierstein, 1971) و مانیویت و همکاران (Manivit, et al., 1977) از اولین

توالی را می‌توان به عنوان آخرین حادثه زیستی ثبت شده نام برد که در محدوده سنومانین پیشین رخ می‌دهد و در سه نمونه پایانی مشاهده شده است. ثبت رویداد نانوفسیلی مذکور به همراه سایر گونه‌های نانوفسیلی مانند *Lithraphidites pseudoquadratus* (سنومانین تورونین)، *Braarudosphaera bigelowii* (سنومانین-عهد حاضر) و *Acuturris scotus* (سنومانین-ماستریشیتین پسین) که اولین ظهورشان در سنومانین می‌باشد، موید وجود مرز کرتاسه پیشین و کرتاسه پسین در برش مورد مطالعه است.

زیست چینه نگاری و تعیین سن

نانوفسیل‌های آهکی به علت دارا بودن تنوع زیاد، قدرت تفکیک بالا و گسترش جهانی یکی از بهترین گروه‌های فسیلی برای انجام مطالعات زیست چینه نگاری به ویژه در بازه زمانی کرتاسه هستند. با توجه به فراوانی نانوفسیل‌ها در برش مورد مطالعه از این گروه فسیلی برای پهنه‌بندی زیستی استفاده شده است. شایان ذکر است زیست چینه نگاری نهشته‌های کرتاسه پیشین و پسین در حوضه تتیس توسط افراد مختلفی مانند تیرستاین (Thierstein, 1971؛ 1973)، سیسینگ (Sissingh, 1977, 1978) و راث (Roth, 1987) انجام شده است.

به منظور انجام پهنه‌بندی زیستی نهشته‌های کرتاسه در برش مورد مطالعه از پهنه‌بندی سیسینگ (Sissingh, 1977) با علامت اختصاری CC اصلاح شده توسط پرچ نیلسون (Perch-Nielsen, 1985) استفاده شده و با زیست پهنه‌های معرفی شده توسط راث (Roth, 1987) اصلاح شده توسط برالوور و همکاران (Bralower, et al., 1993, 1995) با علامت اختصاری NK/NC مقایسه شده است.

به دنبال مطالعات نانوفسیلی انجام شده، نهشته‌های مورد بررسی به چهار زیست پهنه جدا شد (شکل ۳) که با زیست پهنه‌های استاندارد جهانی مطابقت داده شد. در ادامه شرح زیست پهنه‌های تعیین شده، ارائه می‌شود.

و برالور و همکاران (Bralower, et al., 1993, 1995) است.

در برش کوهبنان این زیست‌پهنه بعد از زیست‌پهنه CC8 قرار گرفته و با ضخامت ۲۵/۵ متر مبتنی بر اولین ظهور *Eiffellithus turriseiffelii* در ۲۹۷ متری از قاعده توالی و اولین ظهور *Microrhabdulus decoratus* در نمونه شماره ۱۰۵ و در ۳۲۲/۵ متری از قاعده توالی، تعیین شد. در این مطالعه گونه‌ی *Lithraphidites acutus* مشاهده نشد و امکان تعیین بخش بالایی زیست‌پهنه NC10 میسر نبود.

زیست‌پهنه ۴: *Microrhabdulus decoratus* zone (CC 10) معادل با NC11 و NC12

زیست‌پهنه *Microrhabdulus decoratus* توسط سیسینگ (Sissingh, 1977) معرفی شد و محدوده‌ای از اولین ظهور *Microrhabdulus decoratus* تا اولین ظهور *Quadrum gartneri* را در بر دارد. بازه زمانی این زیست‌پهنه سنومانین پسین است.

زیست‌پهنه CC10 معادل با NC11 (از اولین تا آخرین ظهور *Lithraphidites acutus*) و NC12 (از آخرین ظهور *Lithraphidites acutus* تا اولین ظهور *Quadrum gartneri*) از پهنه‌بندی راث (Roth, 1987) و برالور و همکاران (Bralower, et al., 1993, 1995) می‌باشد.

در این مطالعه بخش پایینی زیست‌پهنه CC10 با اولین ظهور *Microrhabdulus decoratus* در ۳۲۲/۵ متری از قاعده توالی تعیین شد. از آن جا که اولین ظهور *Quadrum gartneri* در ضخامت مطالعه شده ثبت نشد، تعیین لبه بالایی پهنه امکان‌پذیر نشد. علاوه بر آن گونه‌های شاخص زیست‌پهنه‌های NC11 و NC12 مشاهده نشد و تعیین زیست‌پهنه‌های مذکور نیز امکان‌پذیر نیست. بنابراین در نمونه‌های مورد بررسی تداوم حضور گونه *Microrhabdulus decoratus* و عدم مشاهده *Quadrum gartneri* موید آن است که ۳/۵ متر پایانی توالی در بازه زمانی سنومانین پیشین نهشته شده است.

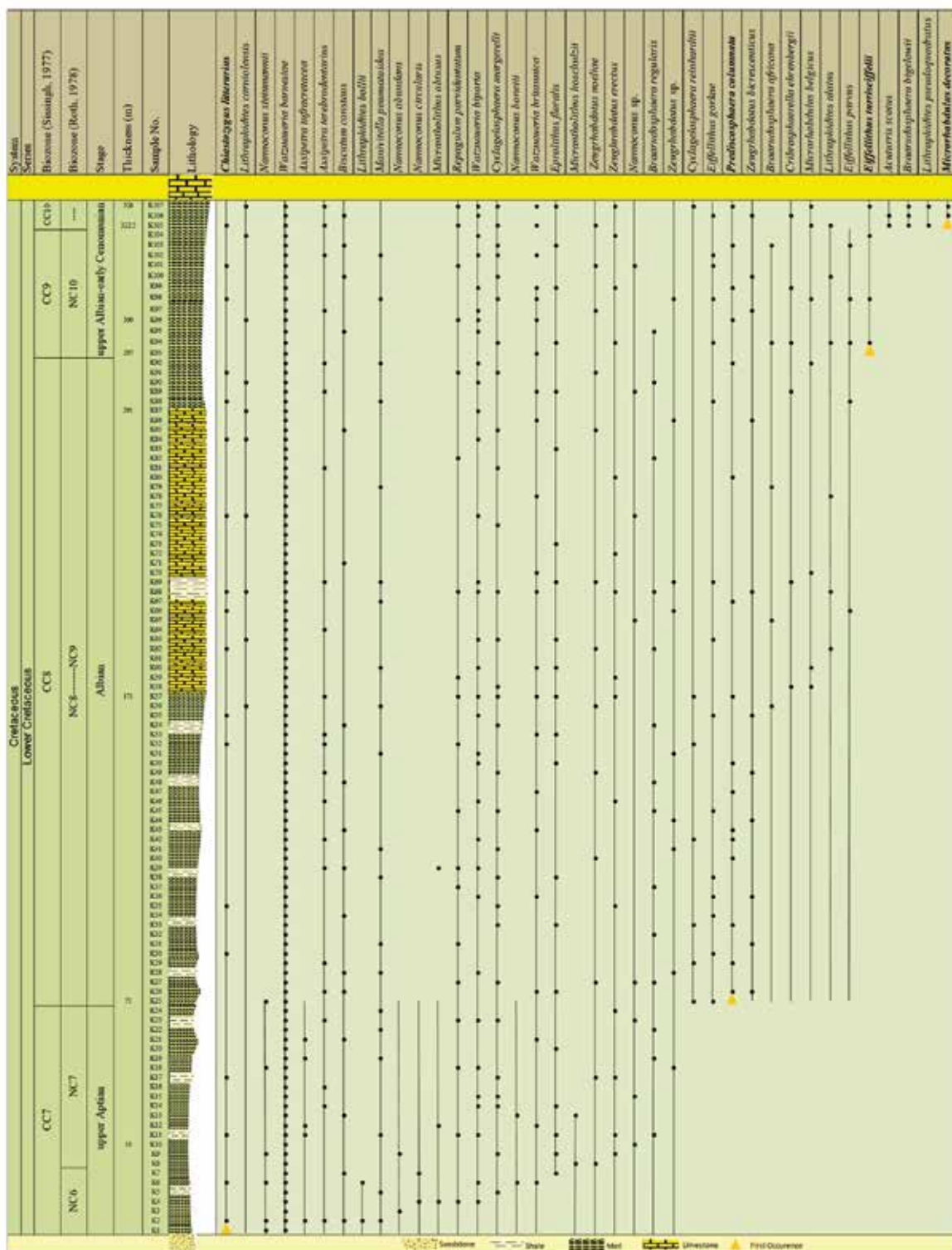
ظهور *Prediscosphaera columnata* تا اولین ظهور *Eiffellithus turriseiffelii* معرفی شده است. پرچ نیلسون (Perch-Nielsen, 1985) زیست‌پهنه CC8 را با توجه به اولین ظهور گونه‌های *Tranolithus phacelosus* و *Corolition signum* به بخش‌های فرعی جدا کرده است. زیست‌پهنه CC8 معادل با زیست‌پهنه NC8 (از اولین ظهور *Prediscosphaera columnata* تا اولین ظهور *Axopodorhabdus albianus* و NC9 (از اولین ظهور *Eiffellithus turriseiffelii* از پهنه‌بندی راث (Roth, 1987) و برالور و همکاران (Bralower, et al., 1993, 1995) می‌باشد.

محدوده زیست‌پهنه NC8 در این مطالعه با اولین ظهور *Prediscosphaera columnata* در نمونه شماره ۲۵ (۷۵ متری از قاعده توالی) تا اولین ظهور *Eiffellithus turriseiffelii* در نمونه شماره ۹۳ (۲۹۷ متری از قاعده توالی) تعیین شد. بنابراین از ۷۵ متری قاعده تا ۲۹۷ متری یعنی ضخامت ۲۲۲ متر مربوط به این پهنه می‌باشد. به دنبال ثبت اولین ظهور *Prediscosphaera columnata* و *Eiffellithus turriseiffelii* به شرحی که گذشت، بخش پایینی NC8 و بخش بالایی NC9 تعیین شد ولی به دلیل عدم مشاهده *Axopodorhabdus albianus* تعیین مرز دو زیست‌پهنه مذکور میسر نشد.

زیست‌پهنه ۳: *Eiffellithus turriseiffelii* zone (CC 9) معادل با NC10

زیست‌پهنه *Eiffellithus turriseiffelii* توسط سیسینگ (Sissingh, 1977) و تیرستاین (Thierstein, 1971) با محدوده‌ای از اولین ظهور گونه *Eiffellithus turriseiffelii* تا اولین ظهور *Microrhabdulus decoratus* معرفی شده است. سن این زیست‌پهنه آلبین پسین و سنومانین پیشین می‌باشد.

زیست‌پهنه مذکور معادل با زیست‌پهنه NC10 (از اولین ظهور *Eiffellithus turriseiffelii* تا اولین ظهور *Lithraphidites acutus*) از پهنه‌بندی راث (Roth, 1987)



شکل ۳. ستون چینه‌سنگی و گسترش زیست‌چینه‌ای نانوفسیل‌های آهکی در برش کوهبنان

نتیجه‌گیری

به دنبال زیست‌چینه‌نگاری نهشته‌های کرتاسه در برش کوهبنان با ستبرای ۳۲۶ متر و متشکل از مارن و سنگ‌آهک، ۳۸ گونه متعلق به ۱۷ جنس از نانوفسیل‌های شناسایی شد. چگونگی گسترش این گونه‌ها منجر به تفکیک چهار زیست‌پهنه نانوفسیلی در برش مورد مطالعه شد که عبارتند از: *Chiastozygus litterarius zone*، *Prediscosphaera columnata zone*، *Eiffellithus turriseiffelii zone* و بخش پایینی *Microrhabdulus decoratus zone*. براساس این زیست‌پهنه‌ها، نهشته‌های مورد بررسی در این برش، محدوده سنی آپتین تا سنومانین پیشین را در بر می‌گیرند. بررسی گونه‌های نانوفسیلی در این برش و مقایسه با گونه‌های شاخص ایالت‌های جغرافیای دیرینه در زمان کرتاسه، نشانگر تعلق این ناحیه به ایالت تتیس است.

منابع

- آقاناتی، ع.، ۱۳۸۴. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶.
- احمدی، ط.، وزیری، م.ر. و داستانیور، م.، ۱۳۸۸. بیواستراتیگرافی و پالئوآکولوژی رسوبات کرتاسه زیرین در منطقه راور، شمال کرمان، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۲۵ (۲)، ۸۷-۱۱۶.
- اصغری، ل.، وزیری، م.ر. و عرب، ا.، ۱۳۷۷. مطالعه سیستماتیک و پالئوآکولوژی اویسترهای آپتین پسین-سنومانین پیشین (خانواده‌های *Gryphaeidae*، *Ostreidae* و *Palaeolophidae*) در ناحیه شمال غرب کرمان (منطقه کوهبنان)، رخساره‌های رسوبی، ۵ (۲)، ۱۳۵-۱۵۲. [10.22067/sed.facies.v5i2/11177](https://doi.org/10.22067/sed.facies.v5i2/11177).
- خسروتهرانی، خ. و فاریابی، ع.، ۱۳۸۲. مطالعه میکروبیواستراتیگرافی کرتاسه بالایی در نواحی کرمان. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۲، ۴۵-۶۰.
- رامی، م.، ۱۳۸۷. پالئوآکولوژی و بیواستراتیگرافی نهشته‌های کرتاسه میانی (آلبین بالایی-سنومانین زیرین) در غرب و جنوب غرب کوهبنان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۲۷.
- سنماری، س. و فروغی، ف.، ۱۳۹۸. ارزیابی نهشته‌های منسوب به گورپی بر مبنای نانوفسیل‌های آهکی واقع در جنوب غرب بروجن، استان چهارمحال بختیاری. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۳ (۵۰)، ۱-۱۴. [10.22067/1398/13/50/1/5](https://doi.org/10.22067/1398/13/50/1/5).
- سنماری، س.، ۱۴۰۰. چینه‌نگاری زیستی بخش فوقانی سازند گرو براساس نانوفسیل‌های آهکی در برش تاق‌دیس شیخ صالح در شمال غرب کرمانشاه، پهنه لرستان (حوضه زاگرس). فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۵ (۵۸)، ۴۱-۴۹. [10.22067/1398/13/58/4/8](https://doi.org/10.22067/1398/13/58/4/8).
- شمیرانی، ا. و آنتیکی نژاد، ح.، ۱۳۷۲. ریف زنگی آباد. مجله علوم زمین، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی، دوره جدید، ۳، ۱۹، ۷۳.
- شه‌مرادی فهرجی، م.، افقه، م.، نطقی‌مقدم، م.، یزدجردی، ک. و مصطفوی، ب.، ۱۴۰۱. زیست‌چینه‌نگاری نهشته‌های دریایی الیگوسن برش بوجان بر مبنای نانوفسیل‌های آهکی (جنوب غرب کرمان، ایران مرکزی). زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۲ (۴)، ۹۱۰-۹۲۴. [10.22055/aag.2022.40375.2289](https://doi.org/10.22055/aag.2022.40375.2289).
- عرب، ا.، ۱۳۸۹. سیستماتیک فسیل‌ها، پالئوآکولوژی و کمواستراتیگرافی مارن‌های کرتاسه میانی در غرب و شمال غرب کرمان. رساله دکتری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۳۴۷.
- نطقی‌مقدم، م.، جلیلی، ف. و سنماری، س.، ۱۴۰۱. زیست‌چینه‌نگاری نهشته‌های کرتاسه براساس نانوفسیل‌های آهکی در برش چینه‌شناسی خونیک (غرب قاین، شرق ایران). فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۶ (۶۱)، ۳۳-۴۳. [10.22067/1398/13/61/3/0](https://doi.org/10.22067/1398/13/61/3/0).
- وزیری، م.ر.، داستانیور، م.، ماهانی‌پور، ا. و عرب، ا.، ۱۳۸۵. مجموعه ماکروفسیل‌های کرتاسه میانی در غرب ناحیه کرمان، مجله علوم دانشگاه تهران، ۳۲ (۲): ۱۰۵-۱۱۳.
- 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>
- Berberian, M., 2014. Earthquakes and Co-seismic Surface Faulting on the Iranian Plateau-A Historical, Social and Physical Approach. Devel-

- opments in Earth Surface Processes, 17, 2-714.
- Bown, P.R. and Young, J.R., 1998. Techniques. In: Bown, P.R. Ed. Calcareous Nannofossil Biostratigraphy. British Micropalaeontological Society Publication, 16-28.
 - Bown, P.R. and Young, J.R., 1997. Mesozoic calcareous nannoplankton classification. Journal of Nannoplankton Research, 19, 21-36.
 - Bralower, T. J., Leckie, R. M., Sliter, W. V. and Thierstein, H. R., 1995. An integrated Cretaceous microfossil biostratigraphy. SEPM Special Publication, 54, 65-79. 10.2110/pec.95.04.0065
 - Bralower, T. J., Sliter, W. V., Arthur, M. A., Leckie, R. M., Allard, D. J. and Schlanger, S. O., 1993. Dysoxic/anoxic episodes in the Aptian-Albian (Early Cretaceous). American Geophysical Union Schlanger Memorial Volume, Monograph, 73, 5-37. 10.1029/GM077p0005
 - Dimitrijevic, M.D., 1973. Geology of Kerman Region. Institute for Geological and Mining Exploration and Investigation of Nuclear and other mineral Raw materials. Report no. 52, 334.
 - Herrle, J. O., 2003. Reconstructing nutrient dynamics of mid-Cretaceous oceans: evidence from calcareous nannofossils from the Niveau Paquier black shale (SE France). Marine Micropaleontology, 47 (3-4), 307-321. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(02\)00133-0](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(02)00133-0)
 - Huckriede, R., Kursten, M. and Venlaff, H., 1962, Zur geologie des gebiets Zwischen Kerman und Saghand (Iran). Beiheft zum Geologischen Jahrbuch, 51, 1-197.
 - Manivit, H., Perch-Nielsen, K., Prins, B. and Verbeek, J.W., 1977. Mid Cretaceous calcareous nannofossil biostratigraphy, 80, 81-169.
 - Mutterlose, J., 1987. Calcareous nannofossils and belemnites as warmwater indicators from the NW-German Middle Aptian. Geologische Jahrbuch, 96, 293-313.
 - Nadimi, A. R., 2007. Evolution of the Central Iranian basement. Gondwana Research 12(3), 324-333. Doi: 10.1016/j.gr.2006.10.012
 - Perch-Nielsen, K., 1985. Mesozoic Calcareous Nannofossils, in Plankton Stratigraphy (eds Bolli, H.M., Saunders, J.B., and Perch-Nielsen, K.). Cambridge University Press, 329-426.
 - Perch-Nielsen, K., 1979. Calcareous nannofossils from the Cretaceous between the North Sea and the Mediterranean. Aspekte der Kreide Europas. IUGS Series A, 6, 223-272.
 - Premoli Silva, I., Erba, E. and Tornaghi, M., 1989. Paleoenvironmental signals and changes in surface fertility in mid Cretaceous Corg-rich pelagic facies of the Fucoide Marls (Central Italy). Geobios, 22(1), 225-236. [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(89\)80059-2](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(89)80059-2)
 - Reuter, M., Piller, W. E., Harzhauser, M., Mandic, O., Berning, B., Rogl, F., Kroh, A., Aubry, M. P., Wielandt-Schuster, U. and Hamedani, A., 2009. The Oligo-/Miocene Qom Formation (Iran): evidence for an early Burdigalian restriction of Tethyan Seaway and closure of its Iranian gateways. International Journal of Earth Sciences, 98, 627-650. 10.1007/s00531-007-0269-9
 - Roth, P.H., 1984. Preservation of calcareous nannofossils and finegrained carbonate particles in mid-Cretaceous sediments from the southern Angola Basin. In: Hay, W.W., (Ed.), Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 651-655.
 - Roth, P.H., 1983. Jurassic and lower Cretaceous calcareous nannofossils in the Western North Atlantic (Site 534): Biostratigraphy, Preservation, and some observations on biogeography and paleoceanography. In: Sheridan, R.E., Gradstein, F.M., et al. (eds.), Initial reports of the deep sea drilling project, 76, 587-621. Doi: 10.2973/dsdp.proc.76.125.1983.
 - Roth, P.H., 1978. Cretaceous nannoplankton biostratigraphy and oceanography of the northwestern Atlantic Ocean. Initial Reports of the

DSDP, 44, 731-760.

- Shahmoradi Fahreji, M., Afghah, M., Notghi Moghaddam, M., Yazdjardi, K. and Mostafavi, B., 2024. Calcareous nannofossil biostratigraphy and paleoecology of the Rupelian-Chattian stages (Oligocene) in the Central Iran basin. *Iranian Journal of Earth Science*, 16 (2), 162410 (1-9). <https://dx.doi.org/10.57647/j.ijes.2024.1602.10>

- Sissingh, W., 1978. Microfossil biostratigraphy and stage-stratotypes of the Cretaceous. *Geologie en Minjbouw.*, 57 (3), 433-440.

- Sissingh, W., 1977. Biostratigraphy of cretaceous calcareous nannoplankton. *Geologie en*

Minjbouw., 56 (1), 37-65.

- Thierstein, H.R., 1976. Mesozoic Calcareous Nannoplankton. *Micropaleontology*, 1, 325-362.

- Thierstein, H.R., 1973. Lower Cretaceous calcareous nannoplankton biostratigraphy. *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, 29, 1-52.

- Thierstein, H.R., 1971. Tentative Lower Cretaceous calcareous nannoplankton zonation. *Eclogae Geol. Helv.*, 64, 459-488.

زمین‌شیمی آرسنیک در محیط‌های آب، خاک و رسوب و ارتباط آن با تجمع زیستی در منطقه بردسیر، کمر بند ارومیه-دختر

راحله هاتفی^(۱)، فرهاد اسدیان^(۲)، زهرا بوسلیک^(۲) و بتول جان‌جانه^(۲)

۱. استادیار، گروه مواد نوین، سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران

۲. گروه زمین‌شناسی محیطی، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی زمین‌شیمی آرسنیک در اجزای محیطی (آب، خاک و رسوب) و ارتباط آن با تجمع زیستی در موی انسان در منطقه بردسیر، واقع در کمر بند آتشفشانی-پلوتونیک ارومیه-دختر انجام شد. برای این منظور، در مجموع ۲۴۰ نمونه شامل ۱۰۰ نمونه آب، ۶۸ نمونه خاک، ۲۱ نمونه رسوب و ۱۰۲ نمونه موی برداشت و به روش ICP-MS آنالیز شد. نتایج نشان داد که میانگین غلظت آرسنیک در آب، خاک و رسوب به ترتیب ۶۶ میکروگرم در لیتر، هفت و پنج میلی‌گرم در کیلوگرم است. در بخشی از آب‌های زیرزمینی، غلظت آرسنیک از حد مجاز جهانی (۱۰ میکروگرم در لیتر، WHO) بیشتر شده و بیانگر آلودگی زمین‌زاد ناشی از حضور سنگ‌های دگرسان شده و سولفیددار است. بررسی‌ها نشان داد که در ۶۱ درصد از نمونه‌های موی انسان، غلظت آرسنیک بالاتر از حد طبیعی (۱ mg/kg) است که گویای رویارویی مزمن جمعیت محلی با آرسنیک می‌باشد. تحلیل همبستگی و رگرسیون نشان داد که رابطه بین آرسنیک مو و آب ($r=0.48$, $R^2=0.23$) قوی‌تر از خاک ($r=0.25$, $R^2=0.06$) و رسوب ($r=0.14$, $R^2=0.02$) است. این موضوع نقش غالب آب زیرزمینی در انتقال آرسنیک به بدن انسان را نشان می‌دهد. از نظر زمین‌شیمیایی، شرایط احیایی آبخوان (اغلب بین ۱۰۰- تا ۲۰۰ mV)، pH قلیایی (۹-۱۰)، و وجود گسل‌های نفوذپذیر در امتداد شمال غرب-جنوب شرق موجب افزایش تحرک آرسنیک به صورت As(III) شده است. نتایج این پژوهش تأیید می‌کند منشأ اصلی آلودگی آرسنیک در منطقه بردسیر زمین‌زاد است و ارتباط تنگاتنگی میان ویژگی‌های زمین‌شناسی، هیدروژئوشیمیایی و تجمع زیستی این عنصر وجود دارد. این نتایج اهمیت پایش مداوم منابع آب زیرزمینی در نواحی دگرسان شده و آتشفشانی کشور را برجسته می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: آرسنیک، بردسیر، زمین‌شناسی محیطی، مو به عنوان شاخص زیستی

مقدمه

کبد، کلیه، طحال، ریه‌ها، دستگاه گوارش و بافت‌های غنی از کراتین (پوست، مو و ناخن) تجمع می‌یابد (Ratnaik, 2003).

شدت اثرات سمی آرسنیک وابسته به دوز و مدت زمان مواجهه است (Schoolmeester and White, 1980). مواجهه طولانی‌مدت با مقادیر پایین آرسنیک می‌تواند سبب بروز اختلالات چندسیستمی از جمله آسیب‌های پوستی (کراتوز و هایپرپیگمانتاسیون)، ناراحتی‌های گوارشی، قلبی-عروقی، عصبی، تناسلی و ادراری (مثانه، پروستات، پستان)، غدد درون‌ریز و سیستم خونی شود (Demissie et al., 2024). مهم‌ترین پیامد این مواجهه، افزایش خطر بروز تومورهای بدخیم در ریه، کبد، کلیه و مثانه است (Speer et al., 2023). حدود دو تا چهار هفته پس از قرارگیری در معرض آرسنیک، بخش عمده‌ای از این عنصر در بافت‌های کراتینی بدن (مو، ناخن و پوست) و تا حدی کمتر در استخوان‌ها و دندان‌ها تجمع می‌یابد (Ganie et al., 2023).

مطالعات جدید نشان داده‌اند که بزاق، ادرار، ناخن و مو می‌توانند شاخص‌های زیستی مؤثر و قابل اعتمادی برای ارزیابی مواجهه با آرسنیک باشند (Liu et al., 2017). ناخن و مو نقش نشانگرهای زیستی را برای تعیین میزان مواجهه محیطی و خطر آرسنیک برای سلامت انسان ایفا می‌کنند (Katz, 2019; Solgi and Mahmoudi, 2022). بافت‌های غیرفعال هستند و در فعالیت متابولیکی شرکت نمی‌کنند (Rezaei et al., 2021). از میان این موارد، مو به دلیل غنی بودن از کراتین، قابلیت بازتاب‌دهندگی مواجهه بلندمدت و پایداری ترکیبات، شاخص قابل اعتمادتری برای بررسی تماس مزمن با آرسنیک در نظر دارند (Nguyen et al., 2018). نتایج آزمایشگاهی همچنین نشان می‌دهد بیش از ۹۰ درصد آرسنیک جذب‌شده از طریق بلع از نوع معدنی است و بیشتر به صورت گونه‌های $As(III)$ و $As(V)$ وجود دارد و کما بیش تمام آرسنیک قابل تشخیص

آرسنیک از عناصر نیمه‌فلزی سمی و متحرک در محیط‌های زمین‌شیمیایی است که حضور آن در سیستم‌های آبی و خاکی می‌تواند تهدیدی جدی برای سلامت انسان باشد. غلظت بالای آرسنیک در آب‌های زیرزمینی و خاک در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه در بنگلادش، هند، کامبوج و چین، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معضلات زیست‌محیطی جهانی شناخته می‌شود (Naujokas et al., 2013). در برخی مناطق ایران نیز مانند آذربایجان، کرمان، خراسان و یزد، وجود غلظت‌های غیرمجاز آرسنیک در آب‌های زیرزمینی گزارش شده است (هاتفی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Sharifi, 2004; Modabberi, 2016; et al., 2016). پورخسروانی، ۱۴۰۲ (رزم آرا و نظری، ۱۳۹۳) و (شاکری و همکاران، ۱۳۹۶)، منشأ حضور آرسنیک در محیط‌های طبیعی می‌تواند زمین‌زاد^۱ یا انسان‌زاد^۲ باشد (Pekey, 2006). در مناطق آتشفشانی و دگرسان‌شده، حضور کانی‌های سولفیدی مانند آرسنوپیریت، رآلگار، اورپمنت و پیریت، از مهم‌ترین منابع زمین‌زاد آلودگی آرسنیک است. اکسایش و انحلال این کانی‌ها در تماس با آب‌های سطحی یا زیرزمینی موجب آزادسازی گونه‌های محلول آرسنیک و انتقال آن به آبخوان‌ها می‌شود و پس از انتقال به آب و خاک کشاورزی می‌تواند وارد چرخه غذایی انسان شود (Cubadda et al., 2017) و سلامت جامعه را با مشکل مواجهه کند (Gundert-Remy et al., 2015). از دیدگاه زمین‌شیمیایی، رفتار آرسنیک در اثر عواملی چون pH، پتانسیل اکسایش-احیا (Eh)، ترکیب کانی‌شناسی و حضور اکسیدهای آهن و منگنز است (Shazzadur Rahman et al., 2023). آرسنیک در محیط‌های طبیعی به دو فرم اصلی معدنی و آلی وجود دارد و ترکیبات معدنی آن در دو حالت اکسایش سه‌ظرفیتی $As(III)$ و پنج‌ظرفیتی $As(V)$ مشاهده می‌شود (Chaudhary et al., 2024). گونه $As(III)$ از نظر زیست‌سمی حدود ۱۰۰ برابر سمی‌تر از $As(V)$ است (Yamauchi and Fowler, 1994)، در حالی که ترکیبات آلی آرسنیک به‌طور معمول سمیت قابل‌توجهی ندارند. آرسنیک سه‌ظرفیتی به دلیل تمایل شدید به گروه‌های تیول (SH-) و سولفیدریل پروتئین‌ها، در بافت‌هایی مانند

1. geogenic
2. anthropogenic

شمال غرب-جنوب شرق تشکیل شده اند، نفوذپذیری سنگ ها را افزایش داده و مسیر مهاجرت محلول های گرمایی را فراهم کرده اند (افتخارنژاد، ۱۳۵۲). رخنمون آپوفیزها، استوک ها و دایک های نفوذی نیز بیانگر فعالیت ماگمایی مکرر و نقش مستقیم آن در دگرسانی و غنی سازی فلزات سنگین در منطقه است (شفیعی، ۱۳۸۷). از آنجاکه هیدروژئولوژی آبخوان و سیستم جریان آب زیرزمینی تأثیر زیادی بر تغییرات کیفی آبخوان ها و میزان انحلال کانی ها و شستشوی رسوبات دارد، بررسی های هیدروژئولوژیکی جزء جدانشدنی مطالعات کیفی آبخوان ها هستند. در پژوهش حاضر به منظور بررسی سیستم جریان آب زیرزمینی نقشه تراز و جهت جریان آب زیرزمینی با استفاده از اطلاعات پیرومترهای موجود در منطقه رسم شد (شکل ۲). بر اساس این نقشه، تراز آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه از ۲۳۹۰ متر در بخش جنوب شرقی تا کمتر از ۲۰۰۰ متر در بخش شمال شرقی متغیر است. دوری و نزدیکی خطوط تراز نشان دهنده شیب هیدولیکی در منطقه مورد مطالعه است. بر اساس نقشه خطوط تراز، نزدیکی خطوط تراز در بخش جنوب شرقی نشان دهنده شیب بیشتر جریان و به تبع آن سرعت بیشتر جریان آب در این بخش است. فواصل بیشتر خطوط تراز در بخش مرکزی نشان دهنده شیب و سرعت کمتر جریان آب و به عبارتی زمان تماس طولانی تر آب با رسوبات آبخوان است.

از دیدگاه زمین ریخت شناسی، منطقه شامل ارتفاعات آتشفشانی با شیب های تند در شمال و شرق و دشت های آبرفتی جوان در جنوب است. جهت جریان عمومی آب های سطحی و زیرزمینی از شمال شرق به جنوب و جنوب غرب بوده که موجب تمرکز محلول های غنی از آرسنیک در دشت بردسیر می شود (زمزم و همکاران، ۱۳۹۰). این شهرستان با جمعیتی حدود ۸۱۹۸۳ نفر (سرشماری ۱۳۹۵) و اقتصاد مبتنی بر کشاورزی و دامداری، وابستگی زیادی به منابع آب زیرزمینی دارد. استفاده مداوم از این منابع برای آبیاری و شرب در کنار حضور سنگ های سولفیددار و دگرسانی گسترده، می تواند زمینه انتقال آرسنیک از سنگ به خاک، آب و در انت ها به چرخه غذایی انسان را فراهم کند که بررسی آن در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است.

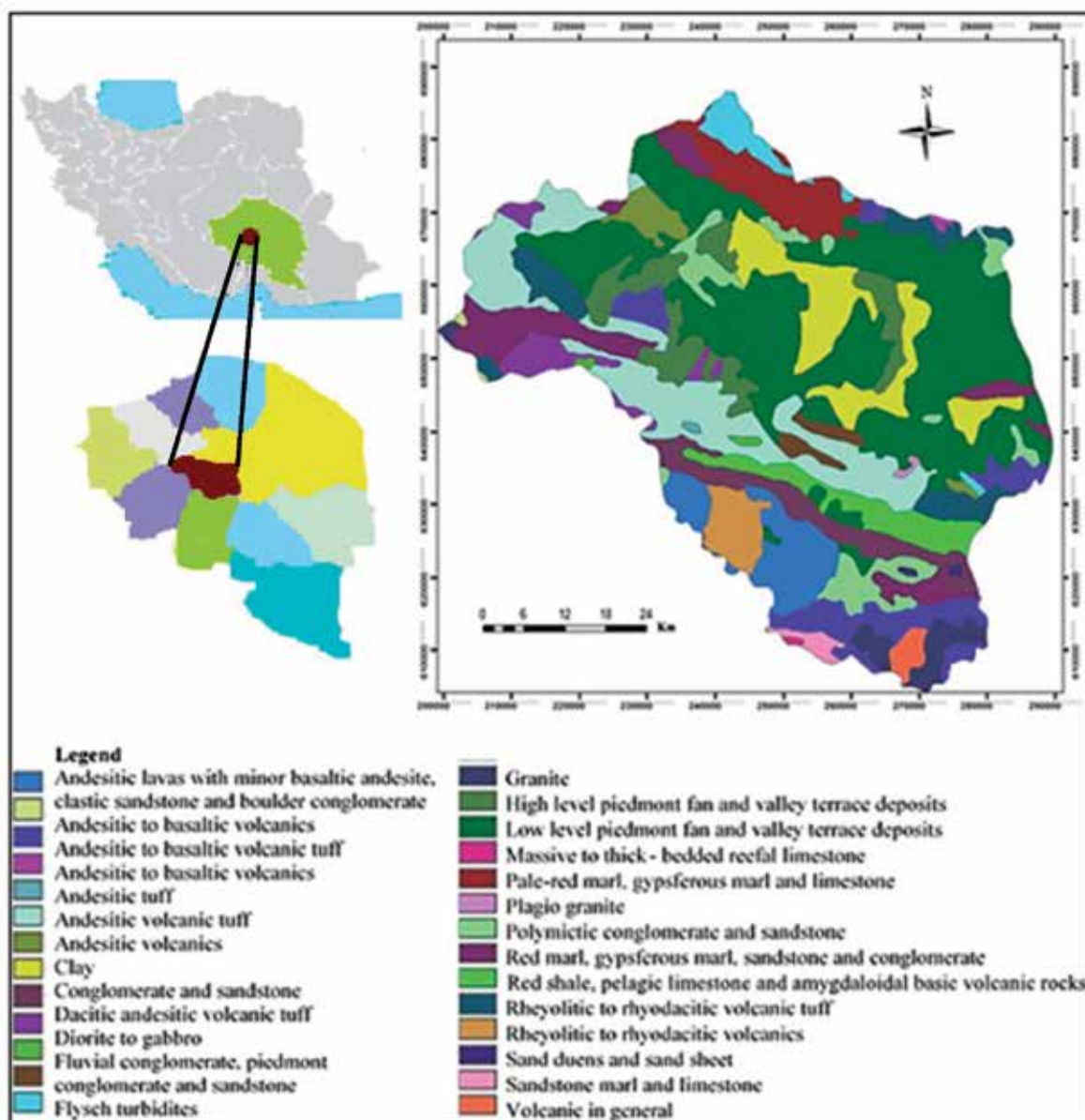
در مو از نوع معدنی است (Cubadda et al., 2017). میانگین غلظت آرسنیک در نمونه های سنگی کمربند ارومیه دختر در گستره بردسیر حدود ۱۲۵ ppm گزارش شده است (Abbasnejad et al., 2013)، که نشان دهنده پتانسیل بالای زمین زاد منطقه برای آزادسازی آرسنیک است. بنابراین، شناخت ارتباط میان غلظت آرسنیک در محیط های مختلف و تجمع زیستی آن در بدن انسان از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به اینکه، مو به عنوان نمایانگر زیستی طبیعی می تواند مواجهه طولانی مدت با آرسنیک را ثبت کند و ابزار مؤثری در مطالعات زمین محیطی محسوب می شود، پژوهش حاضر با تلفیق داده های زمین شیمیایی آب، خاک و رسوب با شاخص زیستی موی انسان، مسیر انتقال آرسنیک از منابع زمین زاد به بدن انسان را در منطقه بردسیر به صورت کمی با بهره گیری از روش های آماری رگرسیون و همبستگی تحلیل کرده است و نقش غالب آب زیرزمینی را در تجمع زیستی آرسنیک مشخص و یک مدل مفهومی از چرخه ژئوشیمیایی-زیستی آن ارائه می دهد. نتایج این پژوهش رویکردی سلامت محور داشته و می تواند مبنایی برای ارزیابی ریسک و پایش محیطی در مناطق آتشفشانی مشابه کشور باشد.

روش مطالعه

منطقه مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شهرستان بردسیر، جنوب غرب استان کرمان و در پهنه ساختاری ایران مرکزی واقع شده (شکل ۱) و بخشی از کمربند آتشفشانی-پلوتونیک ارومیه- دختر به شمار می آید (Berberian and King, 1981). سنگ های غالب منطقه شامل گدازه های آندزیتی، آندزیت بازالتی، بازالتی و برش های آتشفشانی هستند که به دنبال نفوذ توده های گابرویی، دیوریتی و تونالیتی دچار دگرسانی شدید شده اند (نقشه های بردسیر، باغین، چهارگنبد، رفسنجان و بافت سازمان زمین شناسی کشور، ۱۳۸۶). حضور رگه های سیلیسی، کلسیتی و اپیدوتی، شواهد روشنی از فعالیت سیالات گرمایی غنی از فلزات سنگین، از جمله آرسنیک است (احمدی مقدم و احمدی پور، ۱۳۹۳؛ Abbasnejad et al., 2013). این رگه ها بیشتر در امتداد گسل های فعال با روند

زمین شیمی آرسنیک در محیط‌های آب، خاک و رسوب و ارتباط آن با تجمع زیستی در منطقه ...

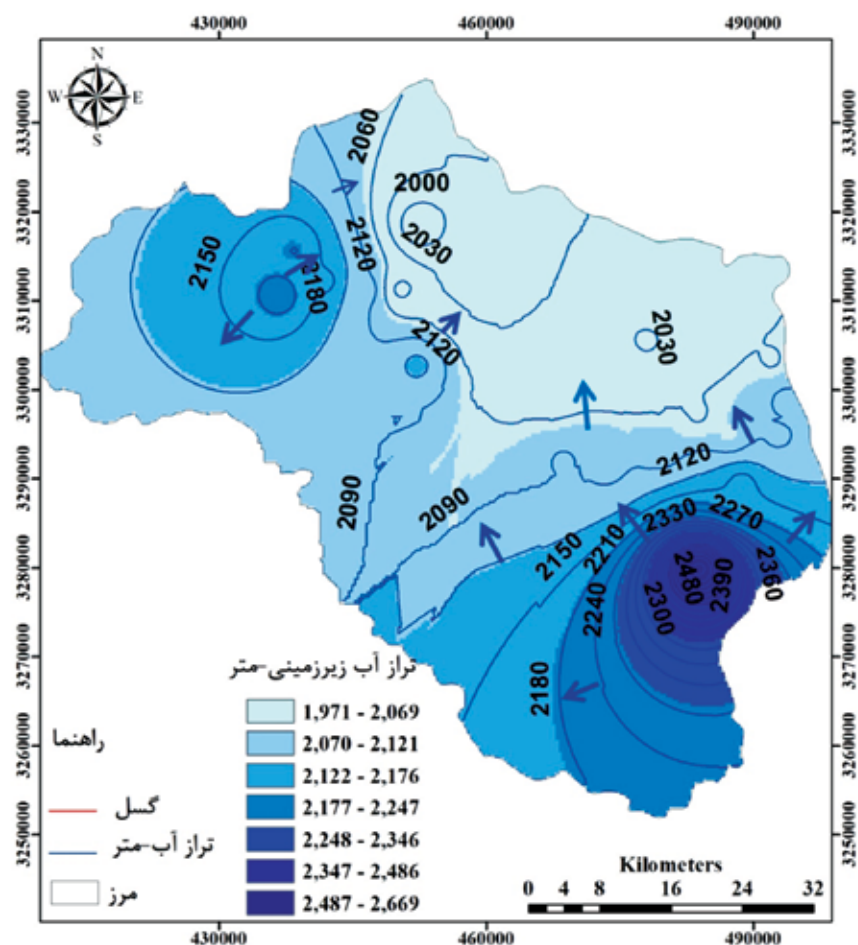


شکل ۱. موقعیت و زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی

نمونه‌برداری

آبی، ۱۰۰ نمونه آب از چاه‌ها، قنات، چشمه‌ها و آب سطحی برداشت شد. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی شامل دما، pH و Eh توسط دستگاه مولتی‌متر ۹۹۷۲۰ ساخت کمپانی MIC تایوان در محل اندازه‌گیری شد و نمونه‌ها پس از اسیدی‌سازی با اسید نیتریک در ظروف پلی‌اتیلنی جمع‌آوری شدند که ۳ بار با آب ایستگاه شسته شده بود. نمونه‌ها در کمتر از یک ماه در آزمایشگاه به روش ICP-MS آنالیز شدند. نمونه‌برداری از

به‌منظور بررسی منشأ و مسیر انتقال آرسنیک در محیط، نمونه‌برداری از چهار پارامتر اصلی شامل آب، خاک، رسوب و موی انسان انجام شد. موقعیت و پراکندگی ایستگاه‌ها بر اساس بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی تعیین شد تا ضمن پوشش مناسب منطقه مطالعاتی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئوشیمیایی منطقه نیز نمایان شود. برای بررسی منابع



شکل ۲. نقشه هم‌تراز و جهت جریان آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی فروردین ماه سال ۱۳۹۶

نمونه‌ها در آزمایشگاه پس از شستشو با محلول‌های استاندارد (Triton X-100، استون و آب دیونیزه) خشک و با اسید نیتریک غلیظ هضم شدند. محلول‌های حاصل به روش ICP-MS مورد تجزیه قرار گرفتند. کنترل کیفیت با استفاده از نمونه‌های مرجع، بلانک و نمونه‌های تکراری انجام گرفت. نتایج حاصل از آنالیزها در محیط نرم‌افزاری ArcGIS برای رسم نقشه‌های پراکندگی و تحلیل‌های آماری و فضایی مورد استفاده قرار گرفت. داده‌ها از نظر نرمال بودن توزیع بررسی و در صورت لزوم تبدیل لگاریتمی شدند. برای بررسی رابطه بین آرسنیک مو و اجزای محیطی، از آزمون همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی ساده استفاده شد. همچنین روابط بین آب، خاک و رسوب به صورت جداگانه تحلیل شد.

خاک‌های کشاورزی با هدف بررسی توزیع سطحی آرسنیک در گستره‌ای به وسعت حدود ۶۱۰۰ کیلومتر مربع انجام شد. در مجموع ۶۸ نمونه خاک از عمق ۱۰-۲۰ سانتی‌متری برداشت و پس از الک از مش ۲ میلی‌متر و خردایش، بخش کوچکت‌ر از ۲۰۰ مش برای آنالیز آماده شد. روش نمونه‌برداری به صورت ترکیبی از پنج نقطه (چهار رأس و مرکز مربع ده‌متری) برای هر ایستگاه بود تا میانگینی از غلظت عناصر در سطح مشخص حاصل شود. به منظور بررسی نقش رسوبات رودخانه‌ای در انتقال آرسنیک، ۲۱ نمونه رسوب سطحی از بستر رودخانه‌ها برداشت شد. نمونه‌ها از لایه ۵ سانتی‌متری فوقانی بستر با ابزار پلاستیکی غیر فلزی جمع‌آوری، در دمای اتاق خشک و پس از الک از مش‌های ۲ میلی‌متر و ۲۰۰ مش به روش ICP-MS تجزیه شدند. در مجموع ۱۰۲ نمونه مو با همکاری ساکنین محلی از مردان ۴۵-۴۰ سال برداشت شد.

بحث

با توجه به اینکه محیط زیست خاستگاه اثرات متقابل زمین‌شناسی و زیست‌شناسی است، غلظت آرسنیک در منابع محیطی و مو (به عنوان یک شاخص زیستی) مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا ۱۰۰ نمونه آب (چاه، چشمه، قنات و رودخانه)، ۶۸ نمونه خاک کشاورزی، ۲۱ نمونه رسوب و ۱۰۲ نمونه مو با پراکندگی مناسب در کل منطقه برای بررسی غلظت و توزیع آرسنیک و تاثیر این منابع بر مسیر و سرنوشت آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. خلاصه آماری نتایج آنالیز آرسنیک به روش ICP-MS در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خلاصه آماری نتایج آنالیز آرسنیک در نمونه‌های آب (ppb)، خاک کشاورزی (ppm)، رسوب (ppm) و مو (mg/Kg) در منطقه مطالعاتی

مو	حد اقل	حد اکثر	میانگین	انحراف معیار
آب	۰/۰۰	۱۶/۰۰	۲/۹۹	۳/۵۷
خاک	۰/۷۴	۴۴/۰۰	۷/۰۲	۸/۷۶
رسوب	۰/۵۰	۱۶/۰۰	۵/۰۷	۴/۰۹
pH آب	۲/۶۲	۱۱/۱۱	۹/۲۵	۱/۲۳
Eh آب	-۳۳۶	۱۵۵	-۱۵۵/۶۱	۷۱/۵۸

غلظت آرسنیک در نمونه‌ها، دامنه‌ای از مقادیر کم تا زیاد را نشان می‌دهد (شکل ۳). میانگین غلظت آن در آب، خاک و رسوب به ترتیب ۶۶ (ppb)، ۷ و ۵ (ppm) است (جدول ۱).

آنالیز شیمیایی آب‌های زیرزمینی نشان داد در بخشی از منطقه، غلظت آرسنیک از حد مجاز جهانی (WHO= 0.01 mg/L) بیشتر است و می‌توان گفت بخشی از منابع آبی منطقه دچار آلودگی زمین‌زاد هستند (شکل ۳-الف). ترکیب شیمیایی آب‌ها نشان می‌دهد آرسنیک اغلب به صورت آرسنیت [As(III)] و گونه‌ی H_3AsO_3 حضور دارد (هاتفی و همکاران، ۱۳۹۷)، که گویای وجود محیط احیایی در اعماق زیاد و تماس آبخوان با سنگ‌های سولفیددار است (Samanta and Clifford, 2006). نقشه پراکنش آرسنیک در آب نشان می‌دهد بیشترین غلظت در

بخش‌های مرکزی و شرقی تا شمال گستره است که در پایین دست برون‌زدهای آتشفشانی و مسیرهای دگرسانی قرار دارند (شکل ۴-الف). مطالعه عباس‌نژاد و همکاران (Abbasnejad et al., 2013) نشان می‌دهد سنگ‌های آتشفشانی واقع در بخش بردسیر از کمربند ارومیه-دختر به‌طور میانگین حاوی حدود ۱۲۵ ppm آرسنیک هستند که بیانگر غنای بالای این عنصر در ترکیب سنگ‌شناسی منطقه است. به نظر می‌رسد فرایندهای هیدروترمال و دگرسانی در سنگ‌های آتشفشانی کمربند ارومیه-دختر و سپس هوازدگی و فرسایش آن‌ها، منبع اصلی آزادسازی آرسنیک به محیط باشند. علاوه بر منشأ زمین‌زاد، عوامل اقلیمی نیز در تشدید آلودگی نقش دارند. خشکسالی و کاهش بارندگی موجب می‌شود که رقیق‌سازی طبیعی آبخوان کاهش یابد و در نتیجه غلظت آرسنیک افزایش یابد (Marghade et al., 2023). همچنین، در چاه‌های عمیق که شرایط کاهشی بر آبخوان حاکم است، تجزیه ترکیبات سولفیدی و آزاد شدن آرسنیک شدت می‌گیرد. در مقابل، در محیط‌های اکسایشی‌تر، تحرک آرسنیک کاهش می‌یابد (Shih, 2005). بدین ترتیب، غلظت بالای آرسنیک در چاه‌های مرکزی دشت بردسیر را می‌توان نتیجه‌ی ترکیب شرایط زمین‌زاد، اقلیمی و هیدروژئوشیمیایی منطقه دانست.

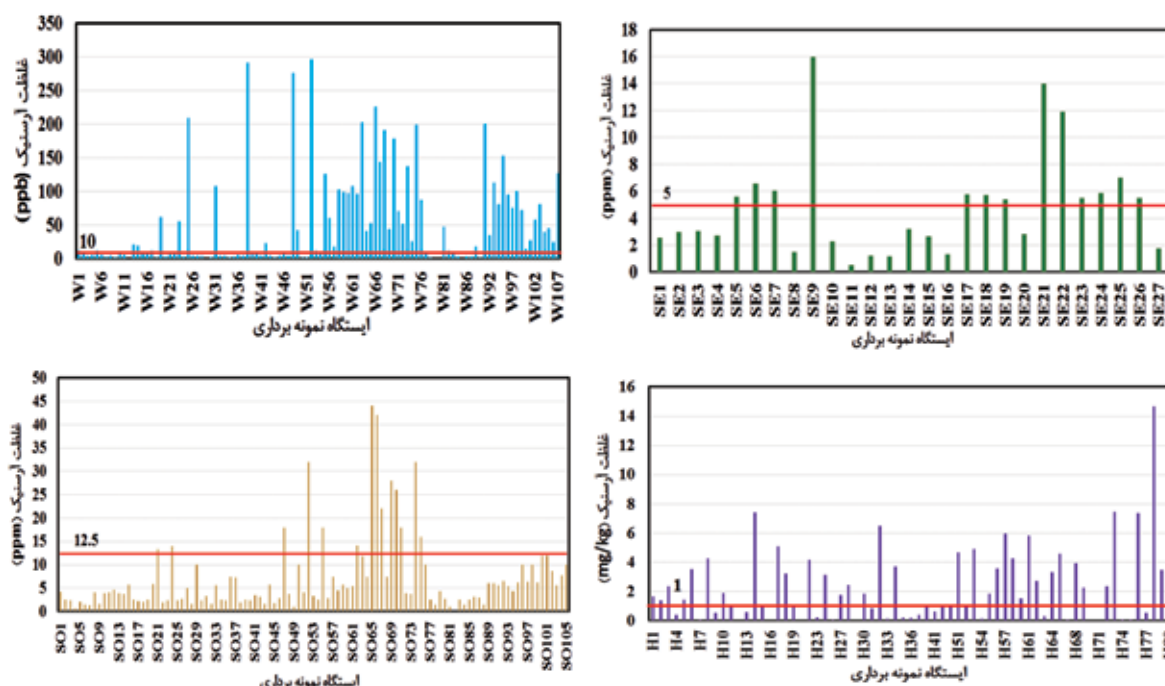
دامنه تغییرات مجاز غلظت آرسنیک در خاک‌های زراعی ۵-۱۲/۵ ppm است (Siegel, 2002). شکل ۳-ب نتایج نشان می‌دهد که خاک گستره مطالعاتی از نظر As، آلودگی کم تا شدید دارد ولی اغلب در گستره بدون آلودگی تا آلودگی کم قرار می‌گیرند. الگوی مکانی غلظت آرسنیک در خاک‌های کشاورزی (شکل ۴-ب) نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر این عناصر در بخش‌های میانی و شمالی منطقه تجمع یافته‌اند. این بخش‌ها غالباً در پایین دست حوضه و در مجاورت رخنمون‌های آتشفشانی قرار دارند و تحت تأثیر جریان‌های سطحی و آبیاری با منابع آب آلوده قرار می‌گیرند. تجمع بالاتر آرسنیک در این بخش‌ها می‌تواند نتیجه هم‌زمان چند فرایند زمین‌شیمیایی و هیدرولوژیکی از جمله انتقال ذرات حاوی آرسنیک توسط سیلاب‌ها از بخش‌های بالادست (Münster et al., 2014; Ngoc et al., 2009) باشد.

۰/۰۲ تا ۱۶/۹ میلی گرم بر کیلوگرم متغیر است و حدود ۶۱ درصد از نمونه‌ها دارای مقادیر بالاتر از حد مجاز طبیعی (WHO, 2013; 1 mg/kg) هستند. این نتایج بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از جمعیت منطقه مواجهه مزمن با آرسنیک قرار دارند (شکل ۳-د). همانطور که پیشتر اشاره شده، منشأ این آلودگی را می‌توان در زمینه زمین‌زاد منطقه جست‌وجو کرد. بررسی نقشه پراکنش مکانی غلظت آرسنیک در مو (شکل ۴-د) نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر در بخش‌های مرکزی و شمالی منطقه مشاهده می‌شود؛ بخش‌های که در پایین دست حوضه، در امتداد مسیر گسل‌های فعال و در مجاورت واحدهای آتشفشانی واقع شده‌اند. این الگو با توزیع مکانی آرسنیک در آب زیرزمینی (شکل ۴) همخوانی دارد و بیانگر نقش غالب آب در انتقال آرسنیک به بدن انسان است. در مقابل، غلظت‌های پایین‌تر در بخش‌های جنوبی و ارتفاعات مشاهده می‌شود که با کمبود منابع آب آلوده و سنگ‌های کم‌آرسنیک مرتبط است. آرسنیک موجود در محیط بیشتر از طریق مصرف آب آشامیدنی آلوده، استفاده از آب‌های زیرزمینی در آبیاری محصولات کشاورزی و ورود غیرمستقیم

و نیز آزادسازی آرسنیک محلول در اثر اکسیداسیون طبیعی آب‌های زیرزمینی هنگام تماس با سطح زمین به دلیل اکسایش آرسنیک سه‌ظرفیتی و افزایش تحرک آن (Missimer et al., 2018) باشد. در نتیجه، استفاده از چنین آب‌هایی در آبیاری اراضی کشاورزی می‌تواند منجر به افزایش غلظت آرسنیک در خاک و در نهایت در محصولات زراعی شود (Ahsan et al., 2020).

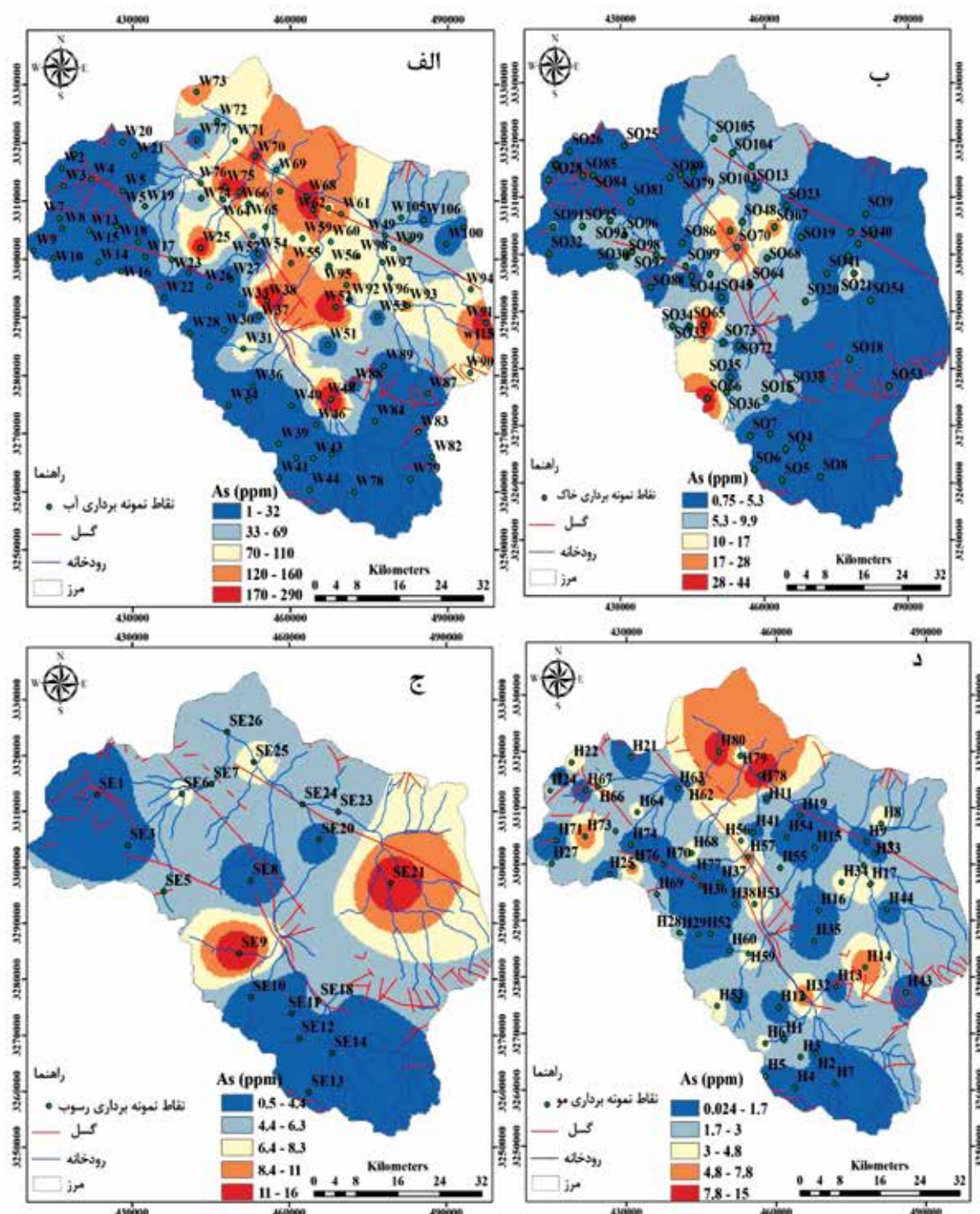
غلظت مجاز آرسنیک در رسوب بستر رودخانه ۵ (ppm) است (Smedley and Kinniburgh, 2002) که با توجه به شکل ۳-ج می‌توان گفت که آلودگی آرسنیک در تعدادی از نمونه‌های برداشت شده مشخص است. این نمونه‌ها در نزدیکی آتشفشان بیدخوان و جنوب غرب حوضه واقع شده‌اند و بیشتر در اثر زمین‌شناسی منطقه و تا حدودی ناشی از فعالیت‌های انسانی و مصرف آفت کش است. نیمی دیگر از نمونه‌های رسوب بدون آلودگی هستند که احتمال دارد ناشی از رقیق شدن آرسنیک در آب و کاهش آلودگی باشد (شکل ۴-ج).

در مجموع ۱۰۲ نمونه موی انسان از بخش‌های مختلف منطقه بردسیر جمع‌آوری و از نظر غلظت آرسنیک آنالیز شدند. نتایج نشان داد که میزان آرسنیک در مو بین



شکل ۳. غلظت آرسنیک در نمونه‌های (الف) آب (ppb)، (ب) خاک کشاورزی، (ج) رسوب (ppm)، (د) مو (mg/Kg)، در منطقه مورد مطالعاتی

زمین شیمی آرسنیک در محیط‌های آب، خاک و رسوب و ارتباط آن با تجمع زیستی در منطقه...



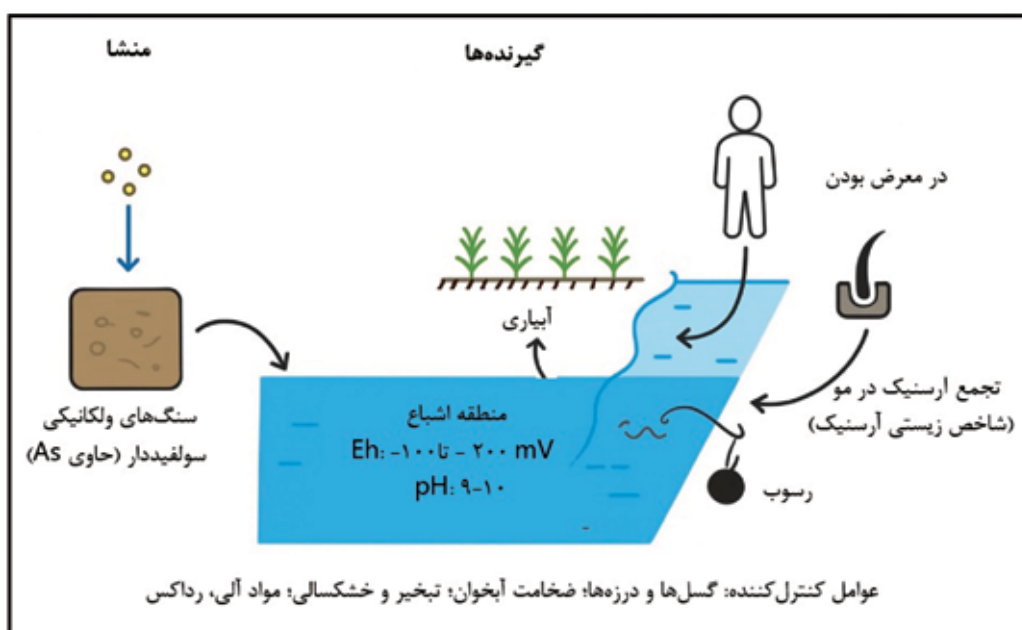
شکل ۴. نقشه توزیع مکانی آرسنیک در آب، خاک، رسوب و مو

در مو تجمع می‌یابد. از آنجا که مو دارای رشد پیوسته است، غلظت آرسنیک در آن بازتابی از مواجهه میان مدت تا بلندمدت (حدود ۶ ماه تا یک سال) فرد محسوب می‌شود. نتایج این پژوهش از نظر دامنه غلظت و الگوی پراکنش، با مطالعات مشابه در مناطق پرخطر جهان مانند

از طریق زنجیره غذایی وارد بدن انسان می‌شود. تماس پوستی و استنشاق گرد و غبار حاوی آرسنیک نیز مسیرهای فرعی محسوب می‌شوند. پس از ورود به بدن، آرسنیک در جریان خون توزیع می‌شود و به دلیل تمایل بالای شیمیایی به گروه‌های سولفید هیدروژن ($-SH$) در پروتئین کراتین،

کافی برای انحلال کانی‌های حاوی آرسنیک و نفوذ به آب می‌باشد. این روند در نقشه پراکندگی آرسنیک در نمونه‌های مو نیز دیده می‌شود. در انتهای جریان به دلیل انباشت آرسنیک و فرصت بیشتر انحلال غلظت این عنصر در آب افزایش یافته است. آنومالی‌های دیده شده در نقشه‌های رسوب و خاک می‌تواند به دلیل زخمون محلی کانی‌های حاوی آرسنیک در این بخش‌ها باشد. سپس آرسنیک از این محیط‌ها وارد زنجیره زیستی (گیاه، حیوان و انسان) شده و در نهایت در بافت‌های کراتینی تجمع می‌یابد. شکل ۵ چارچوبی برای درک مسیرهای انتقال و ارزیابی خطرات بهداشتی مرتبط با آلودگی آرسنیک ارائه می‌دهد.

بنگلادش و بنگال غربی هند مشابهت دارد؛ در آن مناطق نیز ارتباط مستقیم میان غلظت آرسنیک در آب آشامیدنی و میزان تجمع آن در مو و ناخن انسان گزارش شده است (Samanta et al., 2004; Uddin et al., 2006; Chojnacka et al., 2010). هرچند غلظت آرسنیک در موهای افراد منطقه بردسیر نسبت به مناطق مذکور پایین‌تر است، اما گستردگی آلودگی (بیش از ۶۰ درصد نمونه‌ها) و همبستگی آن با منابع زمین‌زاد، بیانگر خطر بالقوه مواجهه مزمن با آرسنیک در این منطقه است. بیشتر بودن غلظت آرسنیک آب زیرزمینی در بخش شرق و شمال‌شرق (در جهت کاهش سرعت جریان) نشان‌دهنده فرصت



شکل ۵. مدل مفهومی چرخه آرسنیک در منطقه مورد مطالعاتی

باشد، خیلی کم و بیشتر از طریق تماس غیرمستقیم یا رژیم غذایی است. همبستگی آرسنیک-مو-رسوب بسیار کم و در عمل بی‌اثر است و حدود دو درصد واریانس مو را توضیح می‌دهد. در مقایسه درون محیطی، همبستگی بین آب و خاک ($r=0.45$) و بین آب و رسوب ($r=0.32$) در حد متوسط است، در حالی که بین خاک و رسوب همبستگی پایین‌تری مشاهده شد ($r=0.31$). این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه اجزای محیطی با هم ارتباط دارند، اما پیچیدگی فرآیندهای ژئوشیمیایی مانع از ایجاد همبستگی‌های بالا می‌شود.

ماتریس همبستگی منابع محیطی با یکدیگر به عنوان فاکتورهای آلاینده و مو به عنوان مقصد نهایی انتقال آلاینده بررسی شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که همبستگی بین آرسنیک مو و منابع آبی متوسط (نزدیک به ۵٪) است و حدود ۲۳ درصد تغییرات آرسنیک مو توسط غلظت آرسنیک آب توضیح داده می‌شود که مبین رابطه مستقیم آرسنیک در آب و مو است و آب بویژه آب آشامیدنی مسیر اصلی و مهم‌ترین منبع در مشارکت زیستی است. در حالی که خاک اثر ضعیف دارد ($r=0.25$) و شاید نقش مستقیمی ندارد و اگر هم اثری داشته

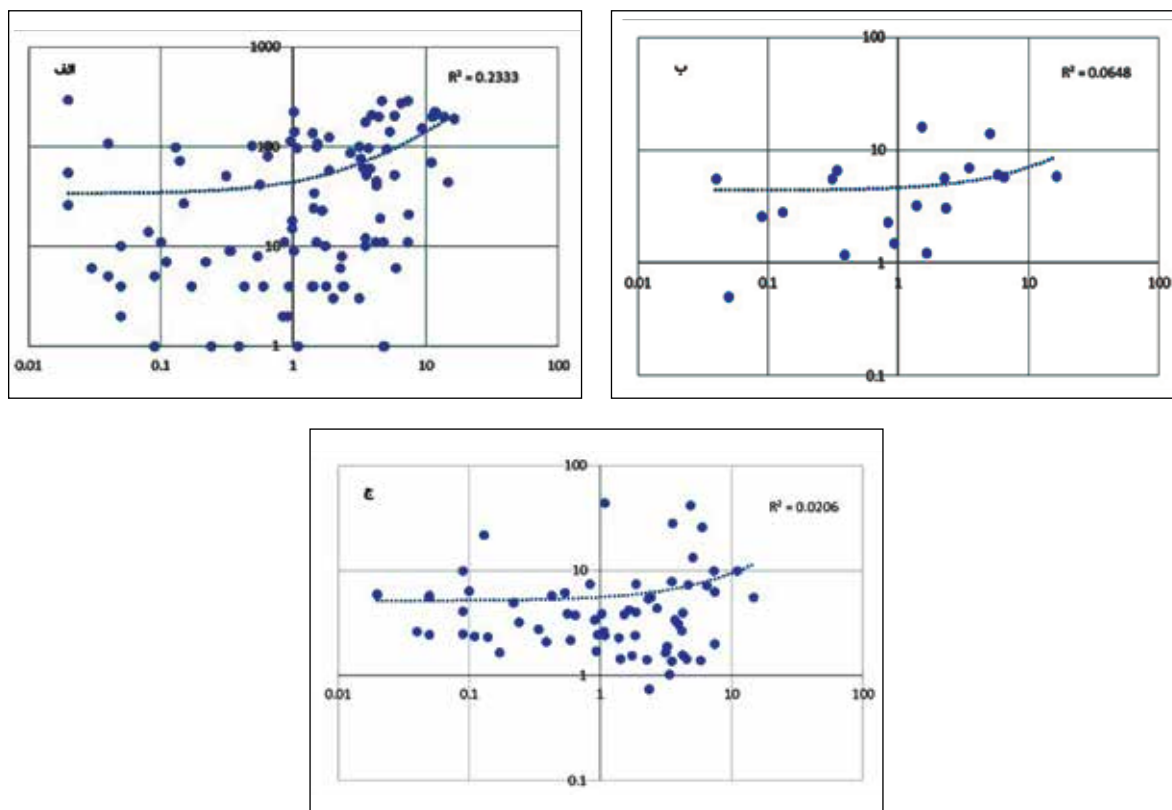
جدول ۲. ماتریس ضریب همبستگی پیرسون آرسنیک آب (ppb)، خاک کشاورزی و رسوب (ppm)، مو (mg/Kg) منطقه مورد مطالعاتی

رسوب	خاک	آب	مو	متغیر
			۱/۰۰	مو
		۱/۰۰	۰/۴۸	آب
	۱/۰۰	۰/۴۵	۰/۲۵	خاک
۱/۰۰	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۱۴	رسوب

برای بررسی ارتباط میان آرسنیک تجمع‌یافته در موی انسان و غلظت آن در اجزای محیطی (آب، خاک و رسوب)، نمودار رگرسیونی بین این متغیرها رسم شد (شکل ۶). نتایج رگرسیون‌ها نشان می‌دهد رفتار آرسنیک در محیط‌های مختلف از الگوی متفاوتی پیروی می‌کند و سهم هر محیط در انتقال آن به بدن انسان متغیر است. شکل ۶-الف (رگرسیون بین آرسنیک مو و آب)، ضریب تعیین $R^2 = 0.2333$ نشان می‌دهد که حدود ۲۳ درصد از تغییرات آرسنیک موجود در مو توسط غلظت آن در آب قابل توضیح است. این مقدار به نسبت متوسط اما معنادار می‌باشد و با ضریب همبستگی پیرسون ($r = 0.48$) نیز سازگار است. شیب مثبت منحنی رگرسیون نشان می‌دهد که با افزایش آرسنیک محلول در آب، میزان تجمع آن در مو نیز افزایش می‌یابد. این یافته بیانگر آن است که آب‌های زیرزمینی مسیر غالب انتقال آرسنیک از محیط زمین‌زاد به بدن انسان هستند. به‌علاوه، مقادیر بالاتر R^2 در مقایسه با خاک و رسوب نشان‌دهنده کنترل ژئوشیمیایی فرآیندهای محلول‌سازی در آبخوان منطقه بردسیر است. از دیدگاه زمین‌شیمیایی، چنین الگویی ناشی از تحرک‌پذیری بالای آرسنیک در آبخوان‌های آتشفشانی و دگرسان شده است. رفتار آرسنیک در منطقه بردسیر، می‌تواند به‌شدت در اثر دگرسانی هیدروترمال، نفوذ توده‌های دیوریتی و گابرویی و اکسایش کانی‌های سولفیدی قرار باشد و سبب رهاسازی آرسنیک و انتقال از فازهای جامد به فاز محلول شود. در این راستا، الگوی ساختاری منطقه، شامل گسل‌های شمال‌غرب-جنوب‌شرق و شمالی-جنوبی، نقش کلیدی در تمرکز سیالات گرمایی و مهاجرت آرسنیک داشته است. این گسل‌ها مسیرهای اصلی برای صعود محلول‌های هیدروترمال

و ورود آرسنیک به سامانه‌های آبی فعلی را فراهم کرده‌اند. همچنین بررسی داده‌های فیزیکوشیمیایی آب نشان داد، مقادیر اکسیداسیون-احیا (Eh) و pH بیشتر نمونه‌ها بین ۱۰۰- تا ۲۵۰- میلی‌ولت و ۹-۱۰ است. چنین شرایط احیایی و pH خنثی تا قلیایی آب، منجر به تشکیل گونه‌های As (III) با تحرک‌پذیری بالا شده و ضخامت زیاد آبخوان و وجود شکستگی‌ها و گسل‌های متعدد باعث افزایش نفوذپذیری سنگ‌ها و تسهیل مهاجرت آرسنیک به آبخوان‌ها و انتقال عمقی آن و ورود به چرخه زیستی شده‌است. در شکل ۶-ب، رگرسیون بین آرسنیک مو و خاک، مقدار $R^2 = 0.0648$ به‌دست آمد که بیانگر ارتباط ضعیف میان این دو متغیر است. این نتیجه حاکی از آن است که اگرچه در خاک‌های منطقه غلظت قابل توجهی از آرسنیک وجود دارد، ولی به‌دلیل حضور کانی‌های رسی گروه اسمکت-ایلیت و میزان بالای CEC (بیات و همکاران، ۱۳۹۵)، آرسنیک در فاز جامد بر روی اکسیدهای آهن و منگنز و کانی‌های رسی مانند اسمکت و ایلیت تثبیت می‌شود. این جذب سطحی بیشتر از نوع جذب لایه‌ای و تبادل یونی است، در حالی که در شرایط احیایی، اکسیدهای Fe/Mn حل‌شده و آرسنیک آزاد می‌شود. بنابراین در خاک‌های منطقه بردسیر با pH قلیایی و شرایط نسبتاً خشک، پایداری آرسنیک بالا و زیست‌فراهمی^۱ آن پایین است. شکل ۶-ج (رگرسیون بین آرسنیک مو و رسوب)، ضریب تعیین $R^2 = 0.206$ محاسبه شد و بیانگر ارتباط بسیار ضعیف بین این دو متغیر است که نشان می‌دهد، رسوبات بستر، علی‌رغم دارا بودن غلظت‌هایی از آرسنیک، به‌دلیل ماهیت معدنی پایدار خود و شرایط اکسیداسیونی حاکم بر سطح، نقش چندانی در آزادسازی یا انتقال آرسنیک به بدن انسان ندارند. در محیط‌های آبی بردسیر، آرسنیک در رسوبات بیشتر در فازهای معدنی مانند فریت‌ها و اکسیدهای آهن تثبیت شده و تحرک آن محدود است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد منابع آب، به‌ویژه آب‌های زیرزمینی، مسیر اصلی انتقال آرسنیک از منشأهای زمین‌زاد به چرخه زیستی در منطقه مورد مطالعه هستند. این یافته‌ها با مطالعات

1. bioavailability



شکل ۶. نمودارهای رگرسیون بین غلظت آرسنیک در موی انسان و اجزای محیطی شامل الف) آب، ب) خاک و ج) رسوب در منطقه بردسیر.

جزئی ممکن است از مصرف طولانی مدت سموم و کودهای شیمیایی کشاورزی ناشی شده باشد. مقایسه این نتایج با مطالعات پیشین در مناطق آتشفشانی دیگر ایران، مانند تکاب (هاتفی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Modabberi, 2004؛ Sharifi et al., 2016)، سیرجان (پورخسروانی، ۱۴۰۲)، تربت حیدریه (نظری و رزم آرا، ۱۳۹۳) و سبلان (شاکری و همکاران، ۱۳۹۶)، نشان می‌دهد، در همه این مناطق نیز منشأ زمین‌زاد و کانی‌های سولفیدی عامل اصلی آزادسازی آرسنیک محسوب می‌شوند. در این مطالعات، همانند منطقه بردسیر، بیشترین غلظت آرسنیک در آب زیرزمینی و کمترین مقدار در رسوبات سطحی گزارش شده است و بازتاب تحرک‌پذیری بالا و پایداری نسبی آرسنیک در فاز محلول است. بدین ترتیب، منابع آب زیرزمینی نقش اصلی را در مواجهه انسانی با آرسنیک ایفا می‌کنند، در حالی که خاک و رسوب سطحی بیشتر بازتاب‌دهنده آلودگی‌های ثانویه است و سهم کمتری در چرخه زیستی دارند. با این حال، هماهنگی و انطباق کاملی در مورد میزان

مشابه در مناطق آتشفشانی جنوب شرق آسیا، آمریکای لاتین (Samanta et al., 2004؛ Singh et al., 2015؛ Nguyen et al., 2018؛ Bundschuh et al., 2021؛ Li et al., 2022) و ایران (سیاره و همکاران، ۱۳۸۶؛ Rezazadeh et al., 2014) هم‌راستا است، جایی که منابع زمین‌زاد آرسنیک عامل غالب آلودگی معرفی شده‌اند. بر این اساس، به نظر می‌رسد وجود آبخوان‌های عمیق و احیایی، رخنمون سنگ‌های دگرسان‌شده و ساختارهای گسلی نفوذپذیر، از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده تحرک و پراکنش آرسنیک در منطقه باشند. به علاوه، شرایط اقلیمی خشک و کاهش تغذیه طبیعی آبخوان در سال‌های اخیر احتمال تمرکز بیشتر آرسنیک را افزایش داده است. با توجه به ماهیت بیشتر کشاورزی منطقه و نبود صنایع دارای پتانسیل انتشار آرسنیک در زمان نمونه‌برداری، می‌توان نتیجه گرفت که منشأ اصلی آرسنیک در منطقه مورد مطالعه نتیجه مستقیم فرایندهای زمین‌زاد و دینامیک هیدروژئوشیمیایی کمربند ارومیه-دختر است و تن‌ها در برخی نقاط، مقادیر

کانی‌شناسی رسی خاک‌های منطقه بردسیر متأثر از سازندهای زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و اقلیم. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۰، ۱۵۱۵-۱۵۳۰.

- پورخسروانی، م.، جمشیدی گوهری، ف. و سیاری، ن.، ۱۴۰۲. ارزیابی تغییرات مکانی عنصر آرسنیک در منابع آب زیرزمینی حوضه سیرجان. مجله سلامت و محیط زیست، دوره شانزدهم، شماره دوم، ۲۸۷ تا ۳۰۲.

- نظری، ا. و رزم‌آرا، م.، ۱۳۹۳. ارزیابی غلظت فلزات سنگین در آب‌های آلوده به آرسنیک منطقه کته‌تلخ (شمال غرب تربت حیدریه) و امکان‌سنجی جذب و حذف آرسنیک از منابع آبی توسط سازندهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

- زمزم، ع.، رهنما، م.ب. و کوچک‌علیزاده، س.، ۱۳۹۰. مدلسازی جریان آب زیرزمینی و بررسی ارتباط بین کاهش سطح آب زیرزمینی و خشکسالی‌ها در دشت بردسیر-کرمان. یازدهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، ۹. - سیاره، ع.ر.، فنودی، م. و دادستان، ا.، ۱۳۸۶. بررسی‌های زمین‌شناسی زیست محیطی در منطقه قروه-بیجار. گزارش سازمان زمین‌شناسی کشور، ۲۳.

- شاکری، ع.، شریفی، م. و مهرابی، ب.، ۱۳۹۶. ارزیابی ریسک اکولوژیکی و منشاء فلزات سنگین و آرسنیک در رسوبات سطحی رودخانه خیاو در منطقه زمین‌گرمایی سبلان، شمال غرب ایران. نشریه زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۲۶. - شفیع، ب.، ۱۳۸۷. الگوی فلزآبی کمر بند مس پورفیری کرمان و رهیافت‌های اکتشافی آن، رساله دکتری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۵۷.

- هاتفی، ر.، اسدیان، ف.، خدایی و ک.، شهبواری، ع.ا.، ۱۳۹۵. پهنه‌بندی اثرات زیست محیطی آلودگی‌های زمین‌زاد در گستره شهرستان تکاب. طرح پژوهشی جهاد دانشگاهی، ۱۵۷.

- Abbasnejad, A., Mirzaie, A., Derakhshani, R. and Esmaeilzadeh, E., 2013. Arsenic in groundwaters of the alluvial aquifer of Bardsir plain, SE Iran. Environmental Earth Science, 69, 2549-2557

- Berberian, M., and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolu-

آلودگی آرسنیک در آب وجود ندارد. این موضوع می‌تواند به دلیل برخی احتمالات مانند ارائه آب آشامیدنی سالم توسط دولت یا دستگاه‌های تصفیه، ساکن نبودن دائم در بردسیر، سم‌زدایی بسته به تفاوت‌های ژنتیکی و فیزیولوژیکی فردی، جنسیت، عادات زندگی و قومیت باشد (Wu et al., 2025).

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد، رفتار و پراکندگی آرسنیک در منطقه بردسیر به‌طور مستقیم تحت تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی و فرایندهای ژئوشیمیایی کمر بند ارومیه-دختر است. غلظت بالای آرسنیک در آب‌های زیرزمینی، همبستگی آن با آرسنیک موجود در مو و تمرکز آلودگی در نواحی مرکزی و شمالی، بیانگر منشأ غالب زمین‌زاد و انتقال محلول‌محور این عنصر است. نتایج رگرسیون نشان داد که آب، مسیر اصلی ورود آرسنیک به بدن انسان است و نقش خاک و رسوب بیشتر ثانویه است. وجود واحدهای آتشفشانی دگرسان‌شده، توده‌های نفوذی و گسل‌های فعال مهم‌ترین عوامل زمین‌زاد آزادسازی آرسنیک در منطقه هستند. مشاهده مقادیر بالاتر از حد مجاز آرسنیک در بیش از ۶۰ درصد از نمونه‌های مو نشان‌دهنده مواجهه مزمن جمعیت محلی است. بنابراین، پایش منظم منابع آب، ارزیابی تغییرات زمانی و بررسی اثرات بهداشتی آرسنیک برای مدیریت خطرات زمین‌زاد در منطقه بردسیر و سایر بخش‌های کمر بند ارومیه-دختر توصیه می‌شود.

منابع

- احمدی مقدم، پ. و احمدی پور، ح.، ۱۳۹۳. بررسی رخساره‌شناسی و محیط تشکیل توالی‌های آتشفشانی کوه چهل تن، واقع در جنوب باختر بردسیر (استان کرمان)، فصلنامه علوم زمین، ۹۴، ۱۰۳-۱۱۲.

- افتخارنژاد، ج.، ۱۳۵۲. مطلبی چند درباره تشکیل حوضه فیلیش در شرق ایران و توجیه آن با تئوری تکتونیک صفحه‌ای، ضمیمه گزارش شماره ۲۲، سازمان زمین‌شناسی کشور.

- بیات، ا.، فرپور، م.ه. و جعفری، ا.، ۱۳۹۵. خصوصیات فیزیکوشیمیایی، میکرومورفولوژیکی و

- tion of Iran, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, 210–265.
- Bundschuh, J., Armienta, M.A., Morales-Simfors, N., Alam, M.R., López D.L. and Quezada, V.D., 2021. Arsenic in Latin America: New findings on source, mobilization and mobility in human environments in 20 countries based on decadal research 2010–2020. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(16), 1727–1865.
 - Chaudhary, M.M., Hussain, S., Du, C., Conway, B.R. and Ghori, M.U., 2024. Arsenic in Water: Understanding the Chemistry, Health Implications, Quantification and Removal Strategies. *Chemical Engineering*, 8(4), 78.
 - Chen, X., Liu, S., Shi, M. and Luo, T., 2025. Arsenic levels in the hair of people exposed to arsenic and awareness of its risk factors. *Environmental Geochemistry and Health*, 47, 1–19.
 - Cubadda, F., Jackson, B.P., Cottingham, K.L., Horne, Y.O.V. and Kurzius-Spencer, M., 2017. Human exposure to dietary inorganic arsenic and other arsenic species: State of knowledge, gaps and uncertainties. *Science of The Total Environment*, 579, 1228–1239.
 - Demissie, S., Mekonen, S., Awoke, T., Teshome, B. and Mengistie, B., 2024. Examining carcinogenic and noncarcinogenic health risks related to arsenic exposure in Ethiopia: A longitudinal study. *Toxicology Reports*, 12, 100–110.
 - Ganie, S.Y., Javaid, D., Hajam, Y.A. and Reshi, M.S., 2023. Arsenic toxicity: sources, pathophysiology and mechanism. *Toxicological Research*, 8, 13(1).
 - Gundert-Remy, U., Damm, G., Foth, H., Freyberger, A., Gebel, T., Golka, K., Röhl, C., Schupp, T., Wollin, K.M. and Hengstler, J.G., 2015. High exposure to inorganic arsenic by food: the need for risk reduction. *Archives of Toxicology*, 89(12), 2219–2227.
 - Katz, S.A., 2019. On the use of hair analysis for assessing arsenic intoxication. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 977.
 - Li, B., Xu, W., Luo, R., Zhuo, S., Guo, X., Cheng, K., Yun, K. and Ma, D., 2022. Estimation of the Frequency and Time of Human Exposure to Arsenic by Single Hair Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(18), 11429.
 - Marghade, D., Mehta, G., Shelare, S., Jadhav, G. and Nikam, C.K., 2023. Arsenic Contamination in Indian Groundwater: From Origin to Mitigation Approaches for a Sustainable Future. *Water*, 15(23), 4125.
 - Modabberi, S., 2004. Environmental geochemistry and trace element anomaly in the Takab area, and their impact on the Zarrineh roud reservoir dam, with special reference to Zarshuran deposit. Ph.D thesis, Shiraz University-Iran, 200 p.
 - Naujokas, M., Anderson, B., Ahsan, H., Vasken, A., Graziano, J. and WA, S., 2013. The broad scope of health effects from chronic arsenic exposure: update on a worldwide public health problem. *Environmental Health Perspectives*, 121, 295–302.
 - Nguyen, T.P.M., Nguyen, T.P.T., Bui, T.H. and Nguyen, T.H., 2018. Concentration of arsenic in groundwater, vegetables, human hair and nails in mining site in the Northern Thai Nguyen province, Vietnam: human exposure and risks assessment[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(3), 602–613.
 - Pekey, H., 2006. Heavy Metal Pollution Assessment in Sediments of the Izmit Bay, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 123, 219–231.
 - Ratnaike, R.N., 2003. Acute and chronic arsenic toxicity. *Journal of Medicine*, 79, 391–396.
 - Rezaei, L., Alipour, V., Sharafi, P., Ghaffari, H., Nematollahi, A., Pesarakloo, V. and Falhri, Y., 2021. Concentration of cadmi-

- um, arsenic, and lead in rice (*Oryza sativa*) and probabilistic health risk assessment: a case study in Hormozgan province, Iran. *Environmental Health Engineering Management*, 8(2), 67-75.
- Rezazadeh F., Jafari R., Sheikhzadeh F. and Paktinat S., 2014. A study on wool arsenic concentration and some blood parameters in sheep flocks grazing around tailing dams of gold mines in Takab, Iran. *Research Opinions in Animal and Veterinary Sciences*, 4(5who) 233-236.
 - Samanta, G., Sharma, R., Roychowdhury, T. and Chakraborti, D., 2004. Arsenic and other elements in hair, nails, and skin-scales of arsenic victims in West Bengal, India. *Science of The Total Environment*, 326(1-3): 33-47.
 - Samanta, G. and Clifford, D.A., 2006. Influence of sulfide (S²⁻) on preservation and speciation of inorganic arsenic in drinking water. *Chemosphere*, 65 (5), 847-853.
 - Schoolmeester, W.L. and White, D.R., 1980. Arsenic poisoning. *Southern Medical Journal*, 73(2), 198-208.
 - Sharifi, R., Moore, F. and Keshavarzi, B., 2016. Mobility and chemical fate of arsenic and antimony in water and sediments of Sarouq River catchment, Takab geothermal field, north-west Iran. *Journal of Environmental Management*, 170, 136-144.
 - Shazzadur Rahman, Md., Selim Reza, A.H.M., Aminul Ahsan, Md. and Abu Bakar Siddique, Md., 2023. Arsenic in groundwater from Southwest Bangladesh: Sources, water quality, and potential health concern. *HydroResearch*, 6, 1-15.
 - Shih, M.C., 2005. An overview of arsenic removal by pressure-driven membrane processes. *Desalination*, 172 (1), 85-97.
 - Siegel, F.R., 2002. *Environmental geochemistry of potentially toxic metals*. Springer, Berlin, 218.
 - Singh, R., Singh, S., Parihar, P., Singh, V.P., and Prasad, S.M., 2015. Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112, 247-270.
 - Smedley, P.L. and Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Apply of Geochemistry*, 17, 517-568.
 - Solgi, E., and Mahmoudi, S., 2022. Arsenic and heavy metal concentrations in human hair from urban areas. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 9(3), 247-253
 - Speer, R.M., Zhou, X., Volk, L.B., Liu, K.J. and Hudson, L.G., 2023. Arsenic and cancer: Evidence and mechanisms. *Advances in Pharmacology*, 96, 151-202.
 - Uddin, M.M., Harun-Ar-Rashid, A.K.M., Hossain, S.M., Hafiz, M.A., Nahar, K. and Mubin, S. H., 2006. Slow arsenic poisoning of the contaminated groundwater users. *Internatinal Journal of Environmental Science and Tecnology*, 3 (4), 447-453
 - WHO, 2013. Progress on sanitation and drinking-water: Fast facts. http://www.who.int/water_sanitation_health/en/index.html.
 - Wu, F., van Geen, A., Graziano, J., Ahmed, K. M., Liu, M., Argos, M., Parvez, F., Choudhury, I., Slavkovich, V. N., Ellis, T., Islam, T., Ahmed, A., Kibriya, M. G., Jasmine, F., Shahriar, M. H., Hasan, R., Shima, S. A., Sarwar, G., Navas-Acien, A., Ahsan, H., & Chen, Y. (2025). Arsenic exposure reduction and chronic disease mortality. *JAMA*. <https://doi.org/10.1001/jama.2025.19161>
 - Yamauchi, H. and Fowler, B.A., 1994. Toxicity and metabolism of inorganic and methylated arsenicals. In: Nriagu, J.O. (Ed.), *Arsenic in the Environment, Part II: Human Health and Ecosystem Effects*. John Wiley & Sons, New York, pp. 35-53.

کاربرد توموگرافی ژئوالکتریک در شناسایی تاثیر گسل‌ها بر هیدروژئولوژی آبخوان آبرفتی بادرود، جنوب شرق کاشان

حمیدرضا ناصری^(۱)، فرشاد علی‌جانی^(۲)، مرتضی درویش سدهی^(۳) و فائزه فلسفی^(۳)

۱. استاد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲. دانشیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶

چکیده

این مطالعه به بررسی ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیک و هیدروشیمیایی آبخوان دشت بادرود، واقع در جنوب شرق کاشان، پرداخته است. با توجه به تفاوت‌های قابل‌توجه در مقادیر املاح و پارامترهای هیدروشیمیایی در بخش‌های مختلف دشت، احتمال وجود ساختارهای مدفون مانند گسل‌ها به عنوان عامل ناهنجاری هیدروژئولوژیک وجود دارد؛ از این رو تلاش شده است تا تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی بر منابع آب زیرزمینی و بهبود مدیریت این منابع در دشت بادرود بررسی شود. روش پژوهش شامل جمع‌آوری داده‌های هدایت الکتریکی، pH و دما (از ۴۰ نمونه آب زیرزمینی در دو دوره اردیبهشت و تیر ۱۳۹۷) و استفاده از روش‌های ژئوالکتریک با آرایه شلومبرژه در سه پروفیل و ۶۱ نقطه سونداژ است. تفسیر داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای IPI2win و RES2DINV برای مدل‌سازی یک‌بعدی و دوبعدی مقاومت ویژه الکتریکی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که آبخوان دشت بادرود از نظر پارامترهای هیدروشیمیایی دارای ناهنجاری‌های قابل‌توجهی است که با الگوی جریان آب زیرزمینی همخوانی ندارد. نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری در عمق‌های مختلف و مقاطع توموگرافی الکتریکی نشان‌دهنده وجود حداقل یک مسیر احتمالی گسل در منطقه است که می‌تواند به عنوان عامل اصلی ناهنجاری‌های هیدروشیمیایی عمل کند. در آبخوان بادرود، این ناهنجاری ساختاری با تغییرات هیدروشیمی منطبق است و به لحاظ هیدروژئولوژی با تفاوت فاحش آبدی‌های چاه‌های آب در اطراف مشخص می‌شود. این یافته‌ها بر لزوم توجه به عوامل تکنیکی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب زیرزمینی تأکید می‌کند. همچنین با ادغام روش‌های ژئوالکتریک و تحلیل‌های هیدروشیمیایی، رویکردی نوین برای شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی مدفون و بررسی اثرات آن‌ها بر کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، بادرود، توموگرافی، گسل، ناهنجاری هیدروژئولوژی، هیدروشیمیایی

مقدمه

گسل های فعال و غیرفعال می توانند بر هیدروژئولوژی آبخوان ها تأثیرگذار باشند.

بررسی تأثیر گسل ها بر آب های زیرزمینی از دو جنبه کمی و کیفی اهمیت دارد. از نظر کمی، گسل ها می توانند باعث افزایش یا کاهش هدایت هیدرولیکی آبخوان ها شوند. این موضوع بطور مستقیم بر مقدار آب قابل استخراج تأثیر می گذارد. از نظر کیفی، گسل ها می توانند باعث تغییرات شیمیایی در آب های زیرزمینی شوند؛ به عنوان مثال، افزایش غلظت سولفات، کلر و سایر یون ها را می توان به حضور گسل ها نسبت داد. در این راستا، مطالعاتی مانند لی و همکاران (Li et al., 2022) در استان یونان چین، نشان داده اند، گسل ها می توانند باعث ایجاد ناهنجاری های هیدروشیمیایی در آب های زیرزمینی شوند. این موضوع می تواند برای مدیریت منابع آب بسیار حائز اهمیت باشد. گسل ها در مقیاس محلی و ناحیه ای می توانند سیستم جریان آب زیرزمینی را به شدت تحت تأثیر قرار دهند (Bense et al., 2003). تغییرات واضح در ضخامت آبخوان، جنس سنگ کف، شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی، و جریان های کانالیزه در امتداد گسل در ارتباط با عملکرد گسل است (Rajabpour et al., 2016). در مناطقی که گسل جریان های عمیق آب زیرزمینی را بالا می آورد، حرکت آب های نیمه گرم و شور عمقی باعث رخداد ناهنجاری های بارز در کیفیت آبخوان می شود. آلپ و همکاران (Alp et al., 2024) به منظور ارزیابی تأثیر پاره گسل های جدید گسل فعال آتاتولی به بررسی ژئوالکتریکی در اطراف دریاچه کوچک چکمجه^۱ پرداختند. نتایج ۱۴ سونداژ برداری الکتریکی عمودی معکوس^۲ (VES) برای ارائه مقاطع مقاومت ویژه در برابر عمق و سه پروفیل داده توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی^۳ (ERT) دو بعدی، نشان دادند که شبکه ای از گسل ها، جدیدترین واحدهای رسوبی را قطع کرده و باعث تغییرات شدید مقاومت ویژه شده اند. روش های مختلفی برای بررسی اثرات گسل ها و شناسایی

آب های زیرزمینی به عنوان یکی از مهم ترین منابع آب شیرین در جهان، نقش بسزایی در تأمین نیازهای کشاورزی، صنعتی و خانگی ایفا می کنند. با این حال، عوامل مختلفی از جمله ساختارهای زمین شناسی، به ویژه گسل ها، می توانند بر کیفیت و کمیت این منابع تأثیرگذار باشند. گسل ها به عنوان ساختارهای چینه ای یا تکتونیکی، می توانند مسیر حرکت آب های زیرزمینی را تغییر دهند و باعث تغییر در ویژگی های هیدروشیمیایی و هیدرولیکی آبخوان ها شوند. این تغییرات می توانند شامل افزایش یا کاهش هدایت هیدرولیکی، تغییر در ترکیب شیمیایی آب و حتی ایجاد ناهنجاری های محلی در آبخوان ها باشند. در سال های اخیر، مطالعات متعددی در ایران و سایر نقاط جهان به بررسی اثرات گسل ها بر آب های زیرزمینی پرداخته اند. به عنوان مثال، در مطالعه ای توسط ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2021)، از روش مقاومت ویژه الکتریکی برای شناسایی گسل های مدفون در آبخوان های شمال چین استفاده شد، نشان داد گسل ها باعث ایجاد ناهنجاری های هیدروشیمیایی قابل توجهی شده اند. همچنین، کومار و همکاران (Kumar et al., 2020) در مطالعه ای در هند نشان دادند که گسل ها می توانند به عنوان مسیرهای ترجیحی برای جریان آب های زیرزمینی عمل کنند و باعث افزایش غلظت املاح در مناطق مشخصی شوند. یان و همکاران (Yan et al., 2026) تغییرات ناشی از تأثیر زلزله در عناصر اصلی، عناصر کمیاب و ایزوتوپ های هیدروژن-اکسیژن با استفاده از داده های پایش با فرکانس بالا در چشمه های آب گرم ناحیه گسلی Xianshuihe در سال های ۲۰۲۱-۲۰۲۲ را مورد بررسی قرار دادند. در طی این مطالعات تجزیه و تحلیل متقابل نشانه های هیدروژئوشیمیایی با شواهد زمین شناسی و ژئوفیزیکی نشان داد، ناهنجاری های هیدروشیمیایی ناشی از زلزله توسط (۱) تکتونیک ناحیه ای؛ (۲) ناهمگونی قطعه گسل و (۳) سازماندهی مجدد مسیر سیال و دینامیک برهمکنش آب و سنگ کنترل می شوند. در ایران نیز مطالعاتی انجام شده است. محمدزاده و همکاران (Mohammadzadeh et al., 2019) در دشت یزد-اردکان، نشان داده اند که

1. Küçükçekmece

2. Vertical electrical sounding

3. Electrical resistivity tomography

روش مطالعه

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

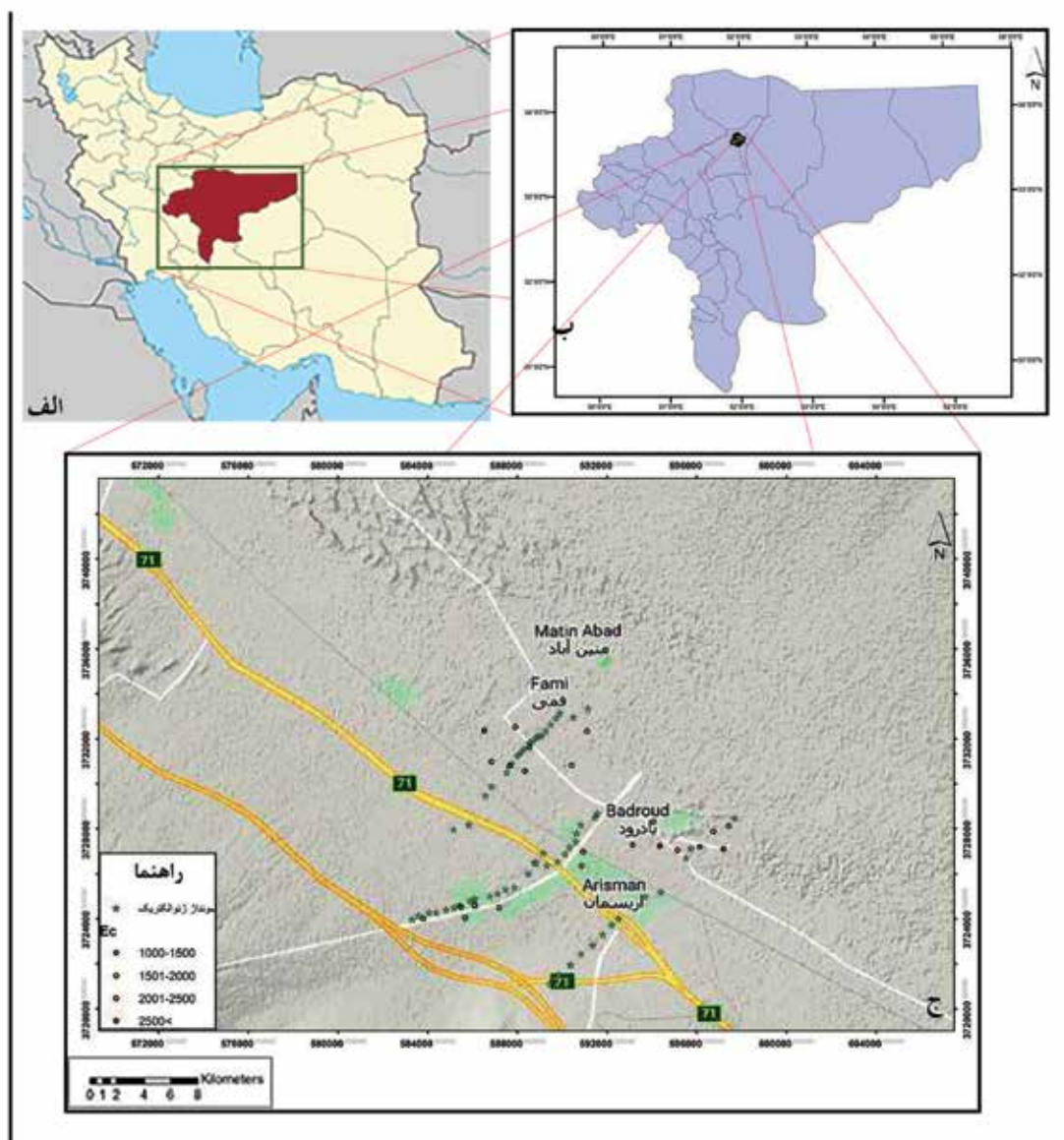
پهنه مورد مطالعه، دشت بادرود، در ۶۰ کیلومتری جنوب شرق کاشان و در ۳۰ کیلومتری شمال شهر نطنز از توابع استان اصفهان واقع شده است (شکل ۱). پهنه مورد مطالعه دارای آب‌وهوای گرم و خشک کویری است. میانگین دمای هوا در تابستان ۳۰ درجه سانتی‌گراد و در زمستان روزها شش درجه و شب‌ها بین منفی دو تا دو درجه سانتی‌گراد است. ارتفاع شهر از سطح دریا حدود ۹۵۵ متر و متوسط بارندگی سالانه در حدود ۱۰۸ میلی‌متر است (سازمان هواشناسی اصفهان، ۱۳۹۵).

طبق تقسیم‌بندی آقائاتی (۱۳۸۳) و درویش‌زاده (۱۳۸۳) پهنه مورد مطالعه در پهنه ساختاری ایران مرکزی و در نوار آتش‌فشانی ارومیه- دخت‌ر قرار دارد. یکی از ساختارهای مهم این پهنه گسل قم- زفره است و از کوه‌های جنوب غربی قم آغاز می‌شود و تا جنوب زفره در ۷۰ کیلومتری اصفهان ادامه پیدا می‌کند. پهنه مورد مطالعه بر روی دو نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ کوه لطیف و نطنز قرار دارد. به‌طور کلی در دشت، با حداکثر پهنای ۴۵ کیلومتر در ناحیه که شمال و جنوب آن ارتفاعات قرار دارند، هشت واحد مختلف زمین‌شناسی آبرفتی عهد حاضر وجود دارد (شکل ۲) و به‌طور کلی شامل مخروط افکنه پای ارتفاعات و آبرفت قدیمه می‌باشند که تا حدودی شیب توپوگرافی سطحی به سمت دشت دارند و از قطعات درشت دانه و ریزدانه تا حدی متراکم شده تشکیل شده‌اند. این واحدهای آبرفت قدیمه توسط قنات‌ها زهکشی می‌شوند. عمده سطح دشت رسوبات آبرفتی جوان با افزایش ضخامت از حاشیه به سمت مرکز دشت می‌باشند و به‌طور عمده درشت دانه و تا حدی با عدسی‌های سیلت و رسی می‌باشند. این رسوبات آبرفتی جوان، آبخوان اصلی بادرود را تشکیل داده‌اند و عمده چاه‌های پهنه در این واحد حفر شده‌اند. علاوه بر این مسیل‌های موجود مواد درشت دانه را از ارتفاعات پایین آورده به صورت کانال‌های مدفون در بین رسوبات جوان قرار داده‌اند (رهگشای، ۱۳۷۶).

آن‌ها در آبخوان‌ها وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی، به‌ویژه روش مقاومت ویژه الکتریکی و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی اشاره کرد. روش مقاومت ویژه الکتریکی به‌دلیل قابلیت تشخیص تغییرات در ویژگی‌های الکتریکی زمین، ابزاری مناسب برای شناسایی گسل‌های مدفون در آبخوان‌های آبرفتی است. در این روش، با استفاده از آرایه‌های مختلفی مانند شلومبرژه، داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی جمع‌آوری می‌شوند، سپس با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند RES2DINV مورد تفسیر قرار می‌گیرند. این روش در مطالعات مختلفی از جمله در ایران (علیجانی و همکاران، ۱۳۹۷)، ژاپن (Wang et al., 2021) و مصر (Ahmed et al., 2020) استفاده شده است.

در مطالعات انجام‌شده در ایران، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده از روش مقاومت ویژه الکتریکی برای شناسایی گسل‌ها و بررسی اثرات آن‌ها بر آب‌های زیرزمینی، به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر معرفی شده است. به‌عنوان مثال، رحیمی و همکاران (Rahimi et al., 2021) در مطالعه‌ای در دشت کرمانشاه، از این روش برای شناسایی گسل‌های مدفون و بررسی اثرات آن‌ها بر کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده کردند. همچنین، حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2020) در مطالعه‌ای در دشت اصفهان، نشان دادند، توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی می‌تواند یک ابزار دقیق برای شناسایی ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیک مرتبط با گسل‌ها باشد.

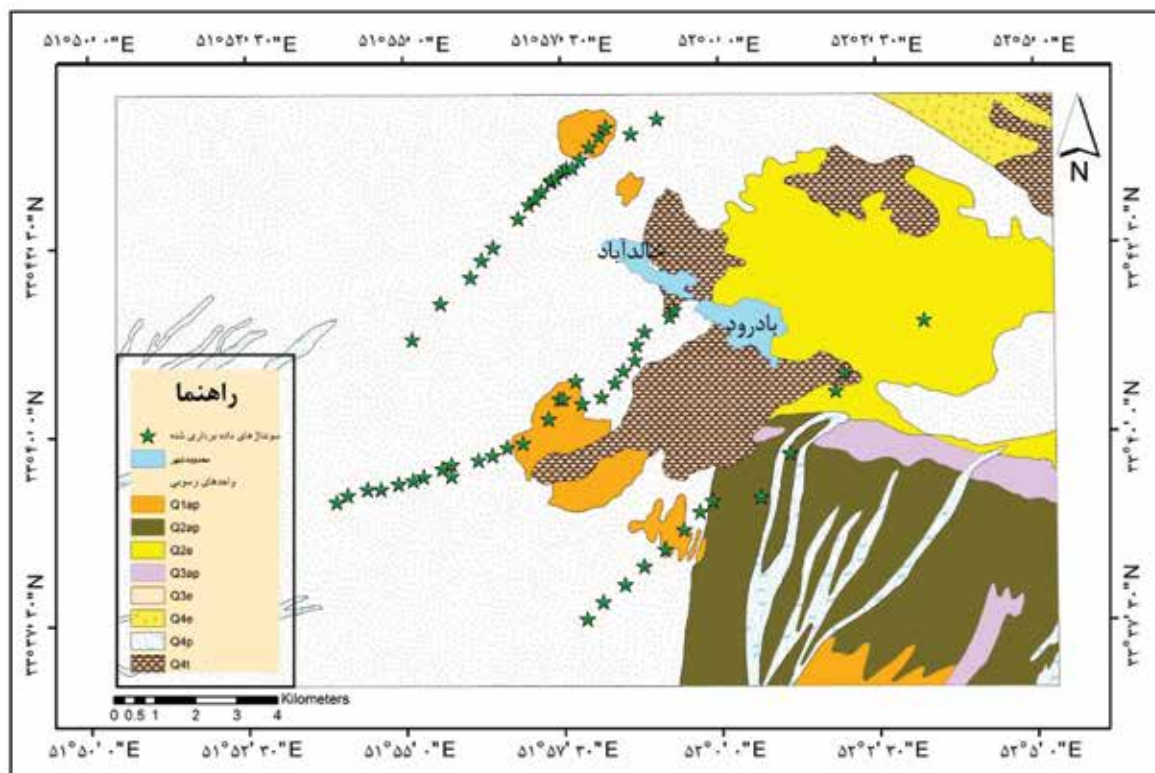
مطالعات منابع آب در پهنه مورد مطالعه (دشت بادرود واقع در جنوب شرق کاشان) نشان می‌دهد، در بخش‌های مختلف این دشت تفاوت قابل‌توجهی از نظر مقدار املاح وجود دارد. این ناهنجاری‌های بارز هیدروشیمی، می‌تواند در ارتباط با ساختارهای زمین‌شناسی همانند گسل مدفون در آبرفت باشد. از این رو، هدف از این مطالعه، بررسی ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیک و هیدروشیمیایی آبخوان دشت بادرود با استفاده از پارامترهای ژئوالکتریک و شناسایی احتمالی گسل‌های مدفون در این ناحیه است. این مطالعه می‌تواند به درک بهتر از تأثیرات ساختارهای زمین‌شناسی بر آب‌های زیرزمینی و مدیریت بهینه منابع آب در این ناحیه کمک کند.



شکل ۱. نقشه موقعیت پهنه مورد مطالعه

هستند. با ارتفاع گرفتن کوه‌های اصلی در ناحیه (دشت حدفاصل بین این دو) بر اثر فشارهای تکتونیکی، شروع به پایین رفتن کردند و بستر مناسبی برای نهشته شدن رسوبات شنی و ماسه‌ای به وجود آورده است. آبخوان آبرفتی گستره بادرود از چند دره بزرگ شامل هنجن، دره ابیانه و دره اوره تغذیه می‌شود. آبخوان از نوع آزاد است و از آبرفت ارتفاعات مجاور تشکیل شده است. یک مخروط افکنه بسیار وسیع در دامنه جنوب غربی در تغذیه آبخوان بسیار موثر است. جنس سنگ بستر در نقاط مختلف آبخوان متفاوت است و در نزدیکی ارتفاعات جنوبی از جنس

واحد رسی Q4t که زمین‌های بادرود روی آن واقع است، دارای شیب کمتر از یک درصد است. Q2e (تپه‌های ماسه بادی) در فاصله دو کیلومتری از شهر بادرود واقع شده است. آبخوان بادرود در امتداد آبرفت‌های مسیل یک جریان زیرزمینی بسیار غنی را تشکیل می‌دهند، در کف دره به آرامی به سمت پایین دست رودخانه حرکت می‌کنند. بر اثر شروع فعالیت آتش‌فشانی کرتاسه زیرین که در ائوسن به اوج خود رسیده، کوه‌های اصلی کرکس به وجود آمده و هم‌زمان به موازات آن در حدود ۵۰ کیلومتر شمال شرق ارتفاعات دم و لطیف شکل گرفتند و در اصطلاح محلی به سیاه کوه مشهور



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی پهنه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کوه لطیف و نظنز)

داشته باشد. برای مطالعه منابع آب‌های زیرزمینی بیشتر از روش ژئوالکتریک استفاده می‌شود. در این مقاله روش مقاومت ویژه الکتریکی به منظور برداشت داده‌ها و تصویرسازی الکتریکی دوبعدی برای شناسایی مسیر گسل زیرسطحی در آبخوان بادرود به کار رفته است. مقاومت الکتریکی سازندهای زمین‌شناسی در اثر حضور مستقیم آب و تغییرات آب زیرزمینی است. مقاومت کلی سازندهای زمین‌شناسی مقدار کمی به ماتریکس سنگ وابسته است و بیشتر به قابلیت هدایت الکتریکی که از طریق حرکت یون‌ها ایجاد می‌شود، بستگی دارد. با افزایش اشباع‌شدگی حفرات، مقاومت ویژه الکتریکی به صورت غیرخطی کاهش پیدا می‌کند. این تغییر مقاومت ویژه الکتریکی به سنگ‌شناسی و کل نمک‌های محلول در آب موجود در حفرات بستگی دارد. مقاومت ویژه الکتریکی یک ویژگی کلی است و مستقل از شکل، اندازه و وضعیت هندسی ذرات تشکیل دهنده ماده می‌باشد (Chandra, 2016).

آرایه شلومبرژه یکی از کاربردی‌ترین و مرسوم‌ترین آرایه‌ها است. در این پژوهش از این روش استفاده شده است. در این آرایه نقطه برداشت وسط آرایه است و الکتروود جریان و

سازندهای مارنی نئوژن و یا توده‌های آذرین و یا شیل‌های ژوراسیک است. ضخامت آبرفت نیز متغیر است و از حدود ۱۰ متر در نزدیکی ارتفاعات تا ۲۵۰ متر تغییر می‌کند. جهت آب زیرزمینی از شمال و جنوب به سمت مرکز آبخوان می‌باشد و غالب تغذیه از این بخش‌ها است. بررسی‌های ژئوالکتریک و اکتشافی مشخصی برای برآورد ضرایب هیدرودینامیک آبخوان صورت نگرفت، با اینحال در محاسبات ذخیره مخزن این آبخوان ضریب آبدی حدود چهار درصد در نظر گرفتند، و نشان‌دهنده ریز دانه بودن آبرفت در بیشتر بخش‌های آن است. وجود واحد ریز دانه شیلی و مارنی در مجاورت آبخوان تایید کننده این موضوع است. بررسی هیدروگراف آبخوان بیانگر یک افت کلی ملایم در طی دوره آماری است. در بازه زمانی ۹۷ تا ۹۹ یک افت ۱۸۰ سانتی‌متری داشته است (شیرخانی و همکاران، ۱۴۰۳).

جمع‌آوری داده‌ها

در مطالعات ژئوفیزیک با توجه به جنبه‌های اقتصادی، روشی انتخاب می‌شود که بتواند پاسخ بهتری برای حل مسائل

پتانسیل نسبت به آن قرینه‌اند؛ که فاصله بین الکترودهای جریان (فاصله AB) بسیار بیشتر از الکترودهای پتانسیل (فاصله MN) است.

در این مطالعه علاوه بر برداشت نمونه از منابع آبی ناحیه، از داده‌های هیدروشیمی بانک کیفی آب زیرزمینی دشت بادرود نیز استفاده شده است (شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، ۱۳۹۶). تعداد نمونه‌های کیفی برداشت شده در مرحله اول، ۱۷ نمونه و در مرحله دوم، ۲۳ نمونه از چاه‌های بهره‌برداری است و EC، pH و دمای این چاه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها با دستگاه‌های EC سنج، pH سنج قلمی و دماسنج برداشت شده است (جدول ۱). به منظور شناسایی دقیق تر ناهنجاری‌ها در آبخوان، داده‌برداری مقاومت ویژه الکتریکی با آرایه شلومبرژه در سه نیم‌رخ و با فواصل سونداژ حداقل ۲۰۰ متر (۶۱ سونداژ) و فاصله الکترودی جریان حداکثر $AB = 600\text{ m}$ (عمق نفوذ احتمالی ۱۵۰ متر) صورت گرفته است.

روش‌شناسی

به منظور انجام مطالعات ژئوالکتریک در پهنه مورد مطالعه، در ابتدای، بازدید میدانی از پهنه طرح صورت گرفت. سپس نقشه‌های هم‌پتانسیل آبخوان برای تعیین جهت جریان آب زیرزمینی تهیه شد. همچنین نقشه‌های هیدروشیمی برای تعیین ناهنجاری تهیه شدند. در نهایت بر اساس محل احتمالی گسل و دره‌های مدفون و با توجه به جهت جریان و الگوی ناهنجاری‌های هیدروشیمی، شبکه سونداژهای ژئوالکتریک در دشت طراحی شد و تلاش شد تا امتداد آن‌ها تعیین کننده عوارض پنهان در آبخوان باشد.

در ادامه با مرتب‌سازی داده‌های ژئوالکتریک، نقشه‌های هم مقاومت ویژه ظاهری در عمق‌های مختلف تهیه و تفسیر شده است. با استفاده از داده‌های موجود نقشه هم مقاومت واقعی، نقشه مقاومت عرضی و نقشه رسانای الکتریکی تهیه و تفسیر شده است. نقشه‌های هم مقاومت ویژه ظاهری دشت با استفاده از داده‌های برداشت شده در AB‌های ۳۰، ۷۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ متر رسم شده است.

پس از جمع‌آوری و تصحیح داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی، تفسیر یک‌بعدی داده‌ها انجام می‌گیرد. نتایج حاصل از تفسیر داده‌ها، اساس مدل‌سازی زیرسطحی است؛ بنابراین تحلیل درست داده‌های مقاومت ویژه، بخش مهمی از روش موردنظر به حساب می‌آید. لازم است بهترین روش تفسیر با کمترین خطا را انتخاب کرد. از این رو برای تفسیر داده‌های این پژوهش از نرم‌افزار IPI2win استفاده شده است این برنامه توانایی بالا و استفاده گسترده‌ای در تفسیر داده‌های مقاومت ویژه و IP دارد. هدف استفاده از این نرم‌افزار، تفکیک رخساره‌های مختلف زمین‌شناسی به روش وارون‌سازی است. در عملیات وارون‌سازی پارامترهای مدل آنقدر تغییر داده می‌شود تا مقادیر به دست آمده مقاومت ویژه بیشترین شباهت را به داده‌های برداشت شده صحرایی داشته باشند.

در تفسیر نتایج، تفسیری که بهترین انطباق را با داده‌های ژئوفیزیکی و اطلاعات زمین‌شناسی و لاگ چاه‌ها داشته باشد انتخاب می‌شود. برای انتخاب بهترین تفسیر لازم است، اطلاعات زمین‌شناسی آن ناحیه از قبل جمع‌آوری شده باشد. دقت در این روش به تجربه کاربر، کیفیت دستگاه ژئوالکتریک و اطلاعات زمین‌شناسی ناحیه وابسته است. برای تفسیر بهتر یک‌بعدی داده‌ها از لاگ چاه‌های موجود استفاده شده است و در ادامه کار داده‌ها به فرمت قابل قبول برای نرم‌افزار Surfer درآمد و سپس با روش کریجینگ درون‌یابی شده‌اند. این داده‌ها به محیط Arc GIS وارد شده و نقشه هم مقاومت ویژه ظاهری در فواصل الکتریکی مورد نیاز تهیه شده است. سپس با داشتن اطلاعات مقاومت و عمق آبخوان تا عمق مورد مطالعه (به سنگ کف برخورد نشده است) نقشه مقاومت عرضی^۱ (RT) آبخوان به دست می‌آید.

در پهنه مورد مطالعه اطلاعات لاگ ۱۰ چاه در دسترس است (شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، ۱۳۹۶). ابتدا لاگ چاه‌های موجود در ناحیه بررسی شده و در ادامه کار در هر نیم‌رخ تعدادی سونداژ در ابتدا، وسط و انتهای خط نیم‌رخ انتخاب و تفسیر یک‌بعدی آن‌ها ارائه شده است.

در این پژوهش برای تفسیر دوبعدی داده‌های مقاومت

1. Transversal Resistivity

جدول ۱. موقعیت برداشت‌ها در مرحله اول و دوم در ماه‌های اردیبهشت و تیر (۱۳۹۷) (هدایت الکتریکی (EC) بر حسب میکروموس بر سانتی‌متر و دما (T) بر حسب درجه سانتی‌گراد)

ID	T	pH 2	pH 1	EC2	EC1	ارتفاع (متر)	UTMy	UTMx
Well 1	۲۳/۵	۷/۱	۶/۶	۱۹۰۹	۱۶۷۲	۱۰۳۶	۳۷۲۴۶۰۱	۵۸۶۰۹۰
Well 2	۲۱/۳		۶/۵		۲۲۰۰	۱۰۴۵	۳۷۲۶۵۱۶	۵۹۰۲۱۶
Well 3	۲۳/۵		۶/۶		۴۰۶۰	۱۰۶۰	۳۷۲۷۰۱۰	۵۸۹۴۵۶
Well 4	۲۳/۵	۷/۳۲	۶/۹	۱۸۲۰	۱۶۲۰	۱۰۴۴	۳۷۲۶۹۸۴	۵۹۰۹۲۸
Well 5	۲۳		۶/۹		۱۸۸۰	۱۰۱۷	۳۷۲۷۰۵۶	۵۹۲۱۳۳
Well 6	۲۵/۳	۷/۲۹	۶/۷	۱۸۴۵	۱۷۶۰	۱۰۰۷	۳۷۲۷۲۰۴	۵۹۳۱۴۱
Well 7	۲۵/۵	۷/۲۱	۶/۶	۲۷۱۰	۳۲۲۲	۱۰۰۰	۳۷۲۷۲۵۵	۵۹۴۳۴۸
Well 8	۲۴/۵	۷/۰۹	۶/۸	۲۲۰۰	۲۰۶۰	۱۰۰۶	۳۷۲۸۳۰۹	۵۹۴۰۶۶
Well 9	۲۵		۶/۶		۱۶۷۳	۱۰۱۳	۳۷۳۰۳۴۴	۵۹۰۶۲۳
Well 10	۲۶/۷	۷/۷۳	۶/۹	۱۵۳۱	۱۳۵۷	۱۰۱۰	۳۷۳۰۸۲۳	۵۹۰۴۲۱
Well 11	۲۵	۷/۶	۶/۷	۲۰۳۰	۱۹۶۸	۱۰۰۷	۳۷۳۲۳۴۷	۵۹۱۱۱۴
Well 12	۲۳/۵		۶/۷		۲۰۰۰	۱۰۰۴	۳۷۳۳۹۳۳	۵۹۰۹۲۱
Well 13	۲۳/۷	۷/۲۵	۶/۸	۱۳۱۹	۱۲۴۴	۱۰۲۶	۳۷۳۳۳۶۴	۵۸۶۵۱۹
Well 14	۲۴		۶/۸		۱۴۱۵	۱۰۱۵	۳۷۳۲۵۴۰	۵۸۷۸۵۱
Well 15	۲۳/۷	۷/۲۷	۶/۸	۱۴۴۹	۱۳۴۷	۱۰۲۵	۳۷۳۰۹۸۴	۵۸۶۸۵۲
Well 16	۲۵	۷/۳۹	۶/۸	۱۳۰۶	۱۹۶۷	۱۰۱۸	۳۷۳۱۶۳۱	۵۸۸۵۳۳
Well 17		۷/۲۱		۱۶۳۶			۳۷۲۴۰۰۰	۵۸۳۸۰۱
Well 18		۷/۱۸		۱۹۴۰		۱۰۱۷	۳۷۲۷۰۵۶	۵۹۵۱۳۳
Well 19		۷/۳۵		۲۶۴۰			۳۷۲۷۲۱۱	۵۹۶۱۳۶
Well 20		۷/۸۲		۲۵۴۰			۳۷۲۸۱۱۳	۵۹۷۱۹۱
Well 21		۷/۱۷		۲۰۴۰			۳۷۲۸۱۱۳	۵۹۷۴۲۳
Well 22		۷/۸۳		۲۰۲۰		۱۰۰۳	۳۷۲۷۸۷۳	۵۹۶۷۴۳
Well 23		۶/۹۶		۱۸۹۰			۳۷۲۴۴۸۹	۵۸۷۱۷۹
Well 24		۷/۳۷		۱۳۶۲			۳۷۳۰۷۹۰	۵۸۷۶۵۷
Well 25		۷/۲۵		۱۵۳۰			۳۷۳۲۵۳۷	۵۸۷۹۰۲
Well 26		۷/۳۷		۱۳۳۳			۳۷۳۰۵۷۲	۵۸۸۳۳۳
Well 27		۷/۲		۱۳۷۰			۳۷۲۴۵۲۴	۵۸۵۴۹۴
Well 28		۷/۵		۱۴۹۸			۳۷۲۴۰۴۷	۵۸۵۶۶۵
Well 29		۷/۴۱		۱۹۶۰			۳۷۲۶۳۵۴	۵۹۰۸۶۱

الکتریکی از نرم‌افزار RES2DINV استفاده شده است. بررسی هیدروشیمی آبخوان بادرود شامل نقشه‌های این نرم‌افزار به‌طور خودکار یک مدل مقاومت دوبعدی از بررسی‌های وارون سازی الکتریکی ایجاد می‌کند. برای تفسیر بهتر و واقعی‌تر از نحوه توزیع مقاومت الکتریکی زیرسطحی می‌بایست وارون سازی شبه مقاطع انجام شود. پس از عملیات صحرایی و برداشت ژئوالکتریک، داده‌های ژئوالکتریک مرتب شده و به فرمت مورد قبول برای تفسیر دوبعدی تبدیل می‌شوند. تغییرات بین شبه مقطع برداشت شده و شبه مقطع محاسبه شده، خطای RMS گفته می‌شود.

بررسی هیدروشیمی آبخوان بادرود شامل نقشه‌های هم EC، هم دما و هم pH است. این نقشه‌ها با استفاده از داده‌های برداشت شده طی دو مرحله در ماه‌های اردیبهشت و تیر ۱۳۹۷ و داده‌های بانک کیفی پهنه مورد مطالعه در سال ۱۳۹۱ (شکل‌های ۳ تا ۵) تهیه شده است. روش مورد استفاده برای درون‌یابی تمام نقشه‌ها، روش کریجینگ در نرم‌افزار Surfer است و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 تهیه و خروجی تهیه شده است.

بحث

بررسی هیدروشیمی آبخوان بادرود

در گستره مورد مطالعه هشت درجه سانتی گراد است. کمینه دما در نقشه ۲۱ درجه سانتی گراد و بیشینه دما ۲۹ درجه سانتی گراد گزارش شده است. چاه های جنوب شرقی گستره دارای بیشترین دما و چاه های شمال گستره به نسبت دارای دمای کمتری است. در شرق پهنه از شمال به جنوب دما روند افزایشی دارد. در جنوب غربی شهر بادرود تغییرات دما روند خاصی ندارد و به نوعی ناهنجاری مشاهده می شود. تغییرات pH در نقشه شکل ۵-پ بین ۷/۵ تا ۸/۵۶ است و هیچ گونه روند خاصی ندارد. با توجه به نقشه شمال و جنوب گستره نسبت به مرکز گستره دارای pH کمتری است و از شرق به غرب ناهنجاری های زیادی مشاهده می شود.

آبخوان دشت بادرود دارای تغییرات زیاد در مقدار پارامترهای هیدروشیمی است. این تغییرات در مرکز گستره و جنوب دشت بادرود به نسبت زیاد است. با توجه به مسیر حرکت آب زیرزمینی در آبخوان که از غرب و جنوب غرب به سمت شمال شرق است، این تغییرات در ارتباط با حرکت آب در آبخوان نیست و آبخوان از نظر پارامترهای هیدروشیمی دارای ناهنجاری های زیادی است.

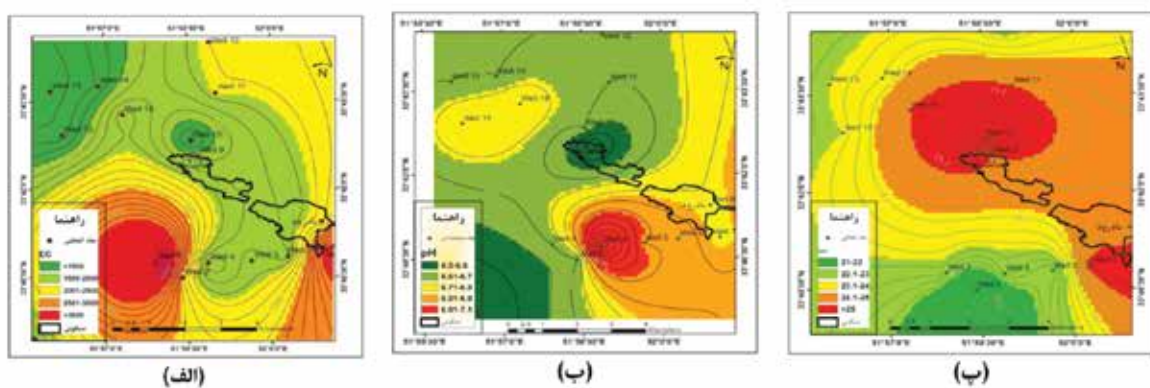
تفسیر یک بعدی داده های ژئوالکتریک

در شکل ۶، مدل الکتریکی و تفسیر یک بعدی سونداژها و ویژگی های لایه های سونداژهای منتخب ارائه شده است. در نیم رخ A-AA و نیم رخ C هر کدام شش سونداژ و نیم رخ B تعداد هفت سونداژ انتخاب شده و مورد تفسیر قرار گرفتند (جدول ۳). به عنوان نمونه سونداژ A17 به طور کل دارای چهار لایه است و دارای مقاومت ویژه متوسط به پایین است. این سونداژ تا عمق سه متری شامل ماسه و شن، از سه تا هفت و نیم متری ماسه ریز، از هفت و نیم تا نوزده و نیم متری ماسه و کمی شن و از نوزده و نیم متری به پایین ماسه ریز است. این سونداژ در حدود ۷۰ متری به آب برخورد کرده است.

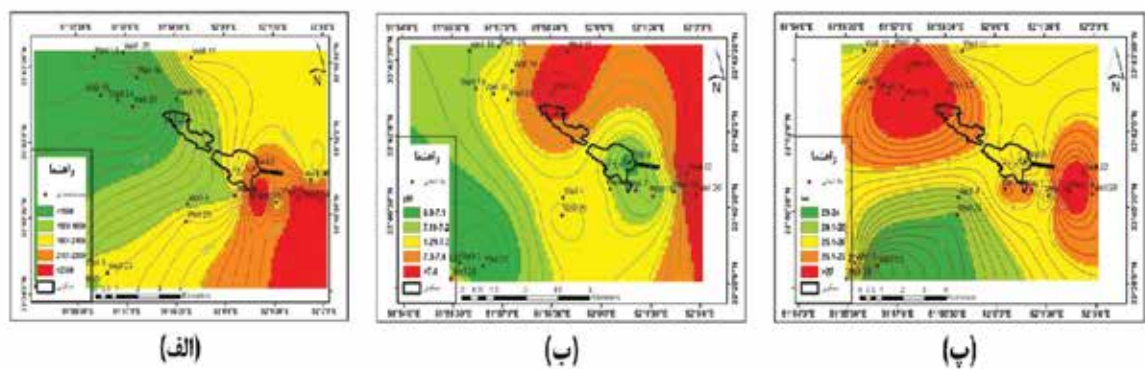
با توجه به نقشه هم EC آبخوان بادرود اردیبهشت ۱۳۹۷، کمترین EC حدود ۱۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتی متر است که در شمال خالدآباد و شمال غرب گستره مشاهده می شود. بیشترین EC، بیش از ۳۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی متر است که در جنوب شرقی و جنوب غربی گستره مشاهده می شود (شکل ۳-الف). در نقشه هم pH در مرحله اول pH از ۶/۵ تا ۷/۱ متغیر است. کمترین pH در بخش شمالی خالدآباد و جنوب غربی گستره است و بیشترین pH در Well4 در جنوب غربی بادرود گزارش شده است (شکل ۳-ب). با توجه به نقشه هم دما مرحله اول کمترین دما ۲۱ درجه سانتی گراد و بیشترین دما، بیش از ۲۵ درجه سانتی گراد است. بیشترین دما در چاه ۱۰ و کمترین دما در چاه ۲ گزارش شده است (شکل ۳-پ).

در نقشه هم EC آبخوان در مرحله دوم کمترین EC، ۱۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتی متر و بیشترین EC، بیش تر از ۲۳۰۰ میکروزیمنس بر سانتی متر است. EC از شمال غرب به سمت جنوب شرق افزایش پیدا می کند (شکل ۴-الف). با توجه به نقشه هم pH مرحله دوم، pH از ۶/۹ تا بیش از ۷/۴ متغیر است. کمترین pH در جنوب غربی و بخشی از شهر بادرود است. از جنوب غرب به سمت شمال شرق تقریباً افزایش pH رخ می دهد، به جز بخشی از شهر بادرود که pH کاهش پیدا می کند (شکل ۴-ب). در نقشه هم دما مرحله دوم حداقل دما ۲۳ و حداکثر دما، بیش از ۲۷ درجه سانتی گراد اندازه گیری شده است. کمترین دما در جنوب غرب گستره و بیشترین دما در شمال غرب خالدآباد و جنوب شرق بادرود گزارش شده است (شکل ۴-پ).

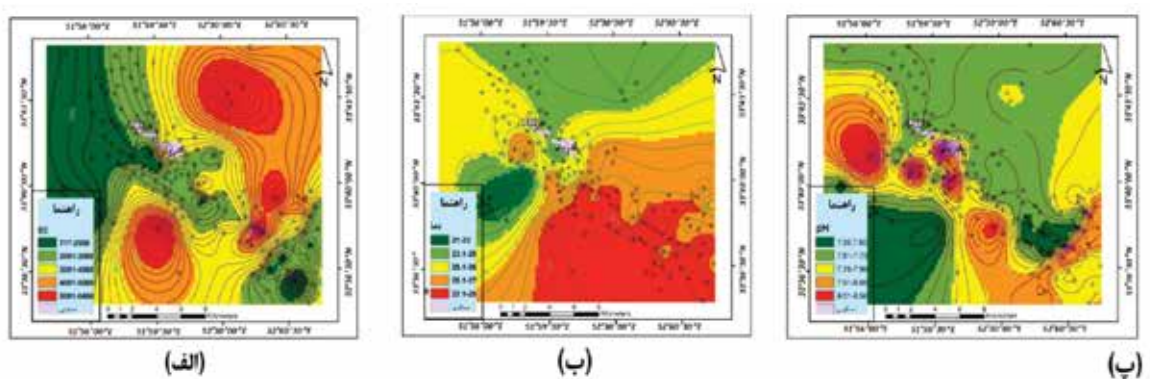
در نقشه هم EC آبخوان بادرود با استفاده از داده های بانک کیفی، کمترین هدایت الکتریکی ۷۱۷ میکروزیمنس بر سانتی متر و بیشترین آن ۶۴۵۰ میکروزیمنس بر سانتی متر گزارش شده است. در این نقشه هیچ روند خاصی مشاهده نمی شود (شکل ۵-الف). با توجه به شکل ۵-ب اختلاف دما



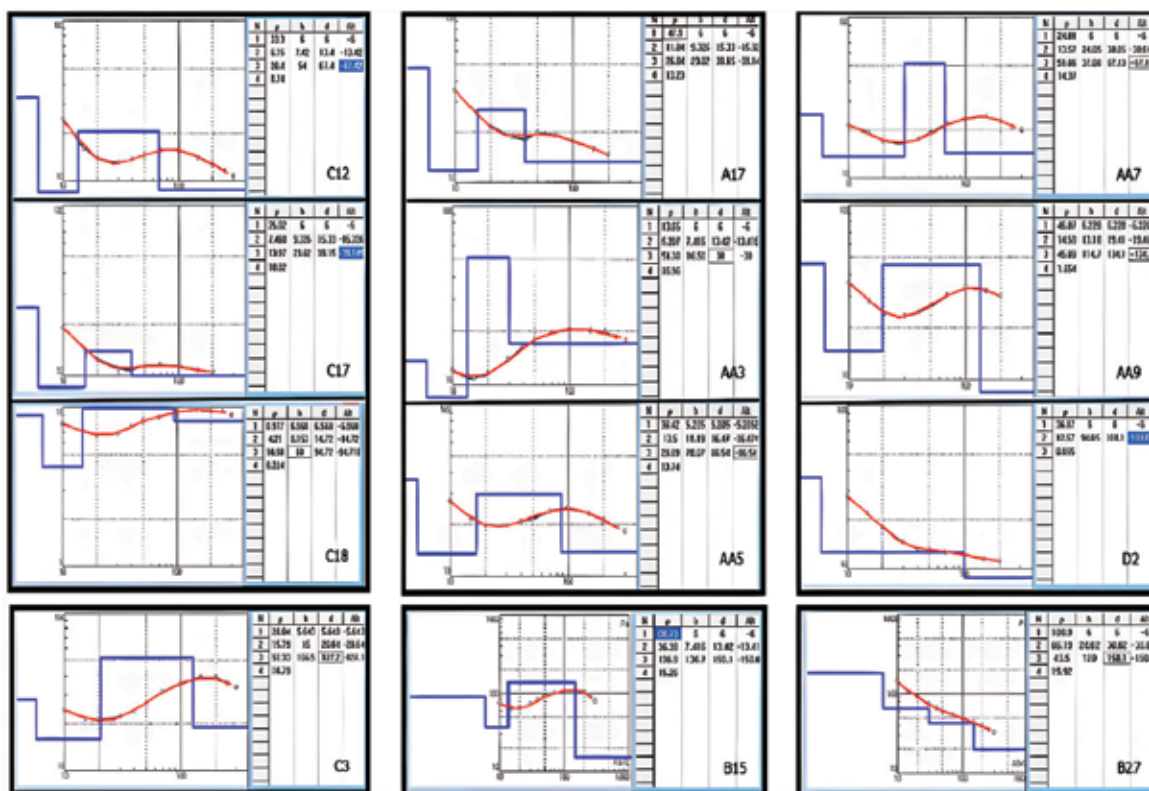
شکل ۳. الف) نقشه هم هدایت الکتریکی برحسب میکروزیمنس بر سانتی متر، ب) نقشه هم pH و پ) نقشه هم دما برحسب درجه سانتی گراد در گستره مورد مطالعه در مرحله اول



شکل ۴. الف) نقشه هم هدایت الکتریکی برحسب میکروزیمنس بر سانتی متر، ب) نقشه هم pH و پ) نقشه هم دما برحسب درجه سانتی گراد در گستره مورد مطالعه در مرحله دوم



شکل ۵. الف) نقشه هم هدایت الکتریکی برحسب میکروزیمنس بر سانتی متر، ب) نقشه هم دما و پ) نقشه هم pH در گستره مورد مطالعه با استفاده از داده های بانک کیفی



شکل ۶. مدل الکتریکی سونداژهای منتخب در پهنه مورد مطالعه

تفسیر دوبعدی داده های ژئوالکتریک

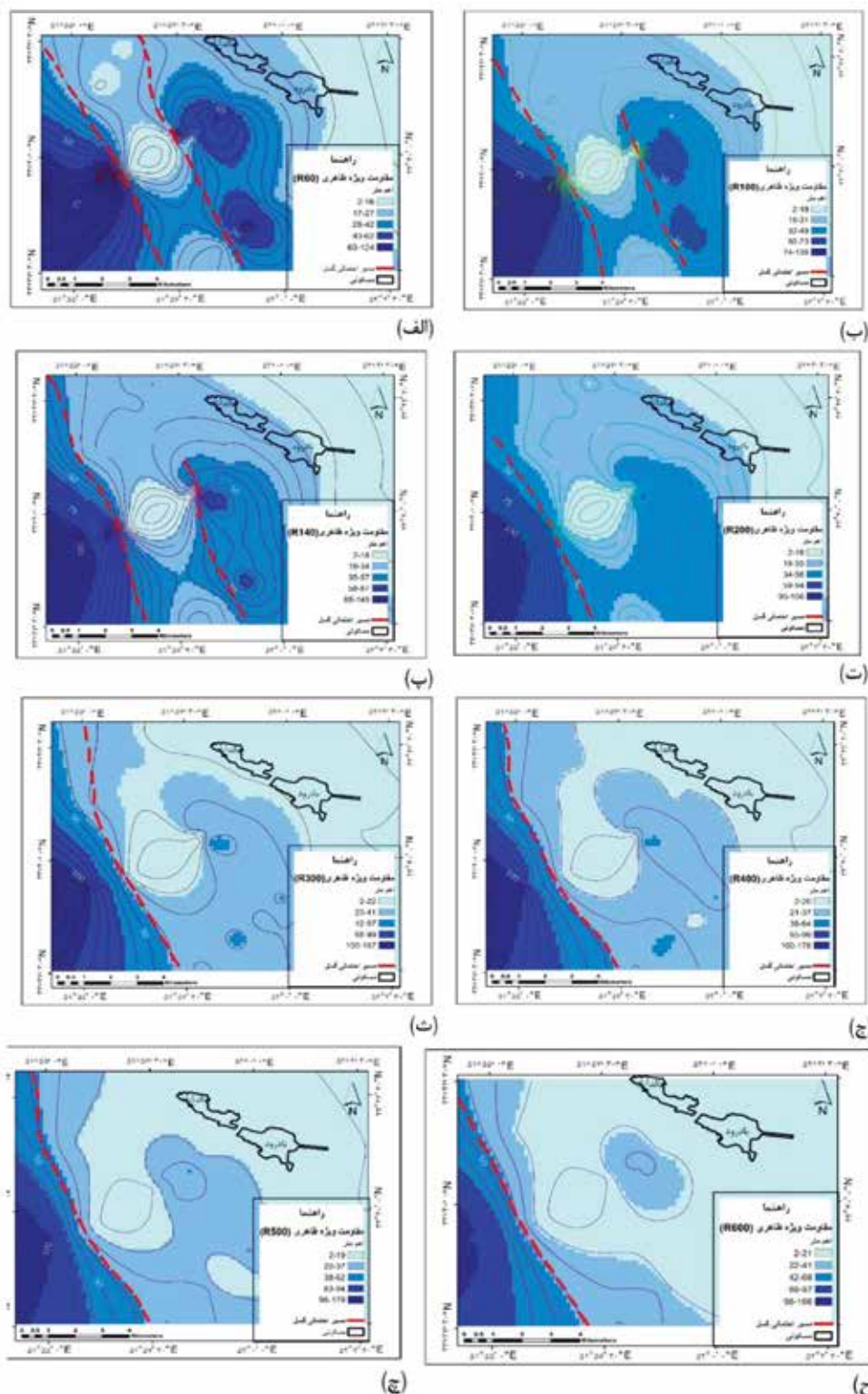
با مرتب سازی داده های ژئوالکتریک ابتدا نقشه های هم مقاومت ویژه ظاهری در عمق های مختلف تهیه شده است. با توجه به اطلاعات لاگ چاه ها (حداکثر عمق ۱۷۷ متر) و تفسیر یک بعدی (تا عمق حدود ۳۰۰ متری) اکثر سونداژها به سنگ بستر برخورد نکرده اند و اطلاعات دقیقی از سنگ بستر موجود نیست. به همین دلیل نقشه هم ضخامت آبخوان قابل رسم نیست. با استفاده از داده های موجود نقشه هم مقاومت واقعی، نقشه مقاومت عرضی و نقشه رسانای الکتریکی تهیه و تفسیر شده است.

شکل ۷-الف هم مقاومت ویژه ظاهری دشت را برای عمق ۳۰ متر (R60) نشان می دهد. مطالعات نقشه های مقاومت ویژه ظاهری در عمق های ۳۰ تا ۳۰۰ متر نشان می دهد، با وجود تغییرات در مقدار مقاومت ویژه ظاهری و همچنین پراکندگی مقاومت ویژه در نقشه نسبت به باقی، الگو اصلی نقشه ها در اعماق مختلف مشابه است (شکل های ۷-الف تا ۷-ج). مقدار مقاومت ویژه ظاهری در عمق های مختلف بین

حدود ۲ تا ۱۷۹ اهم متر متغیر و بیشترین مقدار آن در جنوب غربی گستره، مشاهده می شود که به سمت شمال شرقی از این مقدار کاسته می شود و دوباره مقدار آن افزایش می یابد. این حدفاصل که به سمت دو طرف، افزایش می یابد می تواند تحت تاثیر گسل ایجاد شده و مرز این تغییرات گستره گسلی باشد.

با توجه به شکل ۷-الف دو مسیر احتمالی گسل وجود دارد. در بین دو گسل، مقاومت کمتر و اطراف دو گسل مقاومت بیشتر می شود. با توجه به نقشه مقاومت ویژه ظاهری در عمق تقریبی ۵۰ متر (شکل ۷-ب) نیز مانند عمق تقریبی ۳۰ متر دو گسل در نظر گرفته شده است ولی گسل سمت راست مقداری کوتاه تر می شود. در این نقشه تغییرات مقاومت ویژه ظاهری تقریباً مانند شکل ۷-الف است. نقشه مقاومت ویژه ظاهری در عمق تقریبی ۷۰ متر نیز تقریباً مانند دو عمق قبل است ولی گسل سمت راست تقریباً نصف می شود. با توجه به شکل ۷-ت در عمق ۱۰۰ متر گسل سمت

راست حذف می‌شود و فقط یک مسیر احتمالی گسل باقی می‌ماند. با توجه به شکل ۷-ث در عمق ۱۵۰ متر تغییرات تقریباً مانند شکل ۷-ت می‌باشد و یک مسیر احتمالی گسل



شکل ۷. نقشه مقاومت ویژه ظاهری در عمق تقریبی (الف) ۳۰ متر، (ب) ۵۰ متر، (پ) ۷۰ متر، (ت) ۱۰۰ متر، (ث) ۱۵۰ متر، (ج) ۲۰۰ متر، (ح) ۲۵۰ متر و (ز) ۳۰۰ متر

ضخامت لایه‌ها محاسبه شده است. کمترین مقاومت عرضی الکتریکی لایه آبدار ۴۰۵ و بیشترین ۱۰۱۵۸ اهم متر مربع است. در این نقشه نیز یک مسیر احتمالی گسل شناسایی شده است. رسانایی الکتریکی (شکل ۸-ت) عکس مقاومت ویژه الکتریکی واقعی لایه آبدار است. کمترین رسانایی الکتریکی ۰/۰۰۷ و بیشترین ۰/۲۳۲ زیمنس است. در این نقشه دو مسیر احتمالی گسل مشخص شده است.

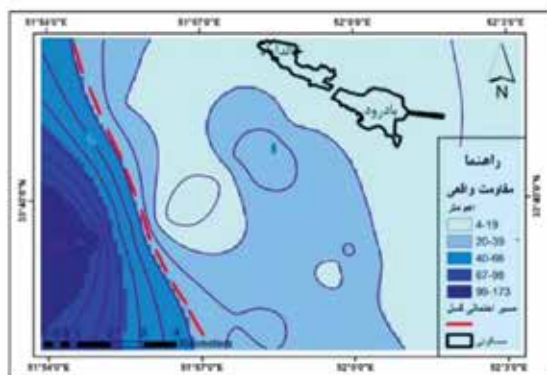
در ادامه از توموگرافی الکتریکی برای تفسیر یافته‌های ژئوالکتریک در سه مقطع استفاده شده است (شکل ۲). مقطع توموگرافی و مدل لیتولوژی سونداژ A-AA با طول تقریبی ۷۷۰۰ متر و ۱۸ سونداژ انتخابی برداشت شده است. برای دقت بیشتر و تفسیر بهتر طول نیمرخ با ضریب افقی ۰/۱ برابر ۷۷۰ متر در نظر گرفته شده است. خطای RMS نیمرخ این مدل پس از پنج مرحله تکرار ۳/۳ درصد حاصل شده است (شکل ۹). در این نیمرخ دامنه تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی از حدود ۳ تا ۷۰ اهم متر است. طبق مدل نیمرخ

مقاومت واقعی گستره با توجه به رابطه زیر محاسبه شده است:

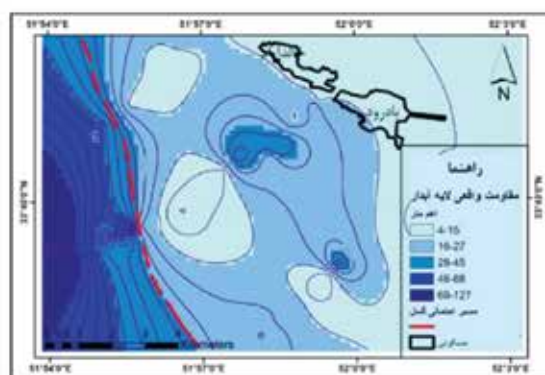
$$RT = [(\rho_1 \times b_1) + (\rho_2 \times b_2) + \dots + (\rho_i \times b_i)] \quad (۱)$$

که RT مقاومت عرضی بر حسب اهم متر مربع، ρ مقاومت ویژه الکتریکی لایه i ام بر حسب اهم متر و b ضخامت لایه بر حسب متر است.

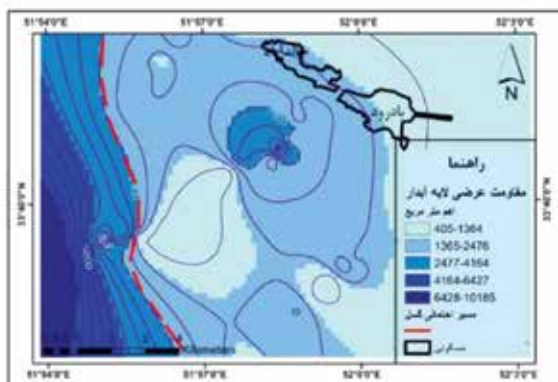
در شکل ۸-الف بیشترین مقاومت ویژه الکتریکی در جنوب غربی و کمترین مقاومت ویژه الکتریکی در شمال شرقی منطقه مورد مطالعه است. در کل با مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری در عمق‌های مختلف مشابه است و یک مسیر احتمالی گسل معرفی شده است. در شکل ۸-ب فقط مقاومت ویژه الکتریکی واقعی لایه آبدار در نظر گرفته شده است. در این نقشه نیز تغییرات از جنوب غرب به شمال شرق کاهش پیدا می‌کند و یک مسیر احتمالی گسل وجود دارد. مقاومت عرضی الکتریکی لایه آبدار (شکل ۸-پ) از حاصلضرب مقاومت ویژه الکتریکی واقعی لایه آبدار در



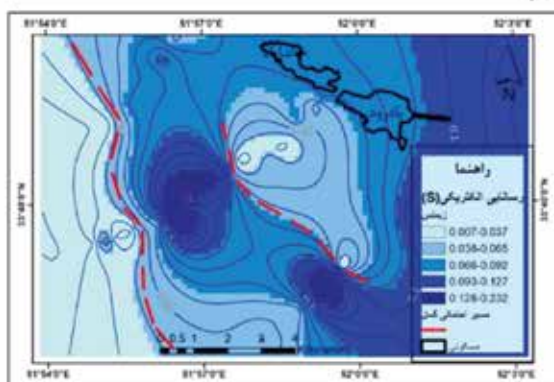
(الف)



(ب)



(پ)



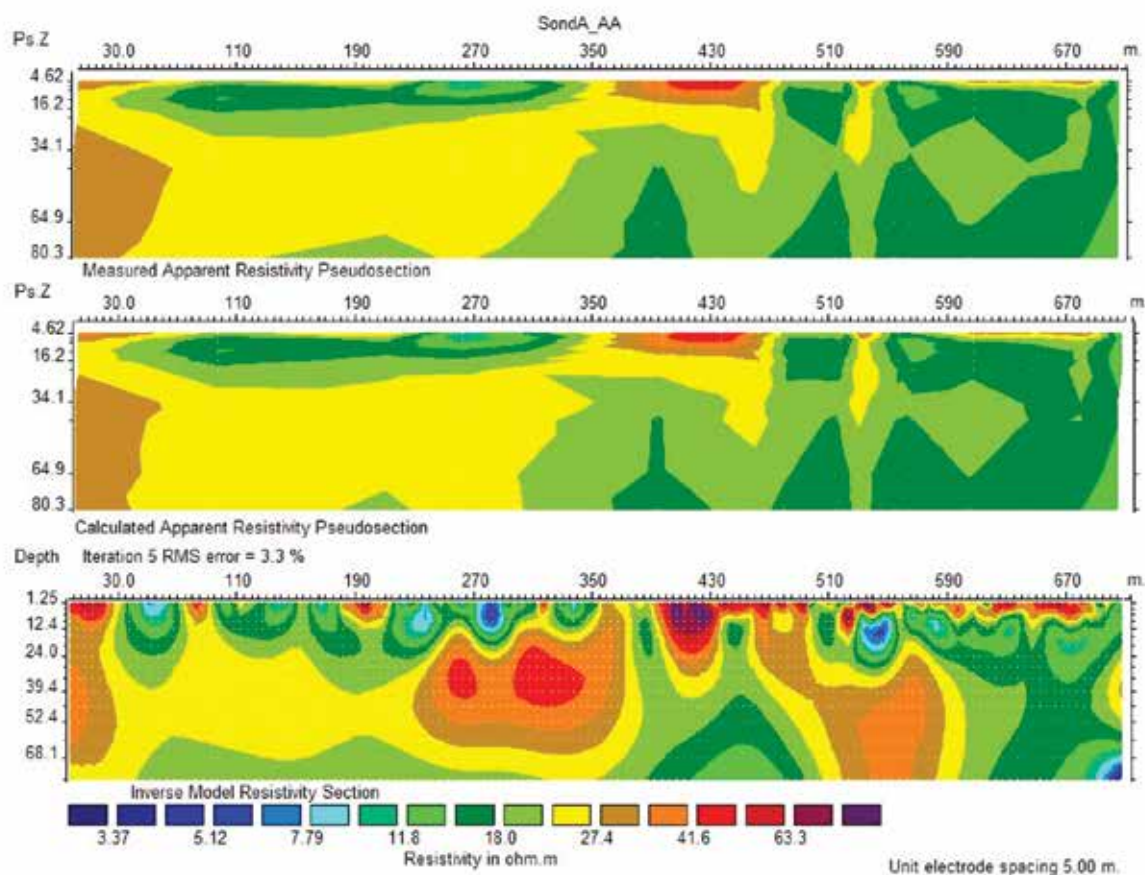
(ت)

شکل ۸. الف) مقاومت ویژه الکتریکی واقعی آبرفت سطحی در پهنه مورد مطالعه، ب) مقاومت ویژه الکتریکی واقعی لایه آبدار، پ) مقاومت عرضی لایه آبدار و ت) رسانایی الکتریکی در پهنه مورد مطالعه

مقطع توموگرافی و مدل لیتولوژی سونداژ C با طول تقریبی ۸۰۰۰ متر و ۱۲ سونداژ انتخابی برداشت شده است. برای دقت بیشتر و تفسیر بهتر طول نیم‌رخ با ضریب افقی ۰/۱ برابر ۸۰۰ متر در نظر گرفته شده است. خطای RMS نیم‌رخ این مدل پس از پنج مرحله تکرار ۳/۶ درصد حاصل شده است (شکل ۱۱). تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در این نیم‌رخ از حدود شش تا ۵۰۰ اهم‌متر است. در ابتدا مقاومت ویژه الکتریکی برداشت‌شده کم است و به تدریج مقاومت ویژه الکتریکی زیاد شده و دوباره کم می‌شود. در اواسط نیم‌رخ در ۴۶۰ متری یک روند خطی مشاهده می‌شود که با تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی همراه است و می‌تواند یکی از اصلی‌ترین دلایل اثبات گسل در ناحیه باشد. در نهایت با توجه به نقشه هم مقاومت ویژه الکتریکی ویژه ظاهری دشت در عمق‌های مختلف و مدل‌های توموگرافی برای هر سه نیم‌رخ حدود موقعیت گسل‌های پهنه مشخص شده است (شکل ۱۲).

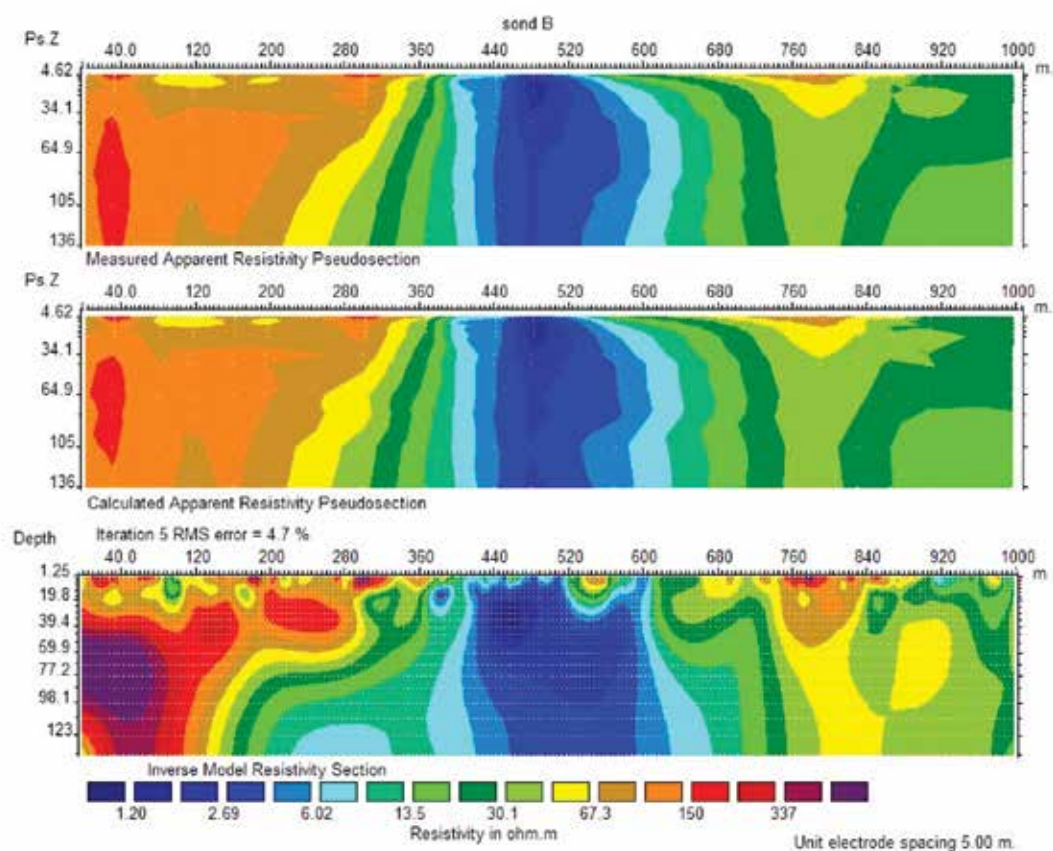
و تفسیر یک‌بعدی داده‌ها در اواسط مقطع یک تغییر ناگهانی در نیم‌رخ حاصل شده است (حدود ۳۸۰ متری) که این می‌تواند بر اثر عملکرد گسل باشد. در این نیم‌رخ از عمق کم به زیاد مقاومت ویژه الکتریکی کاهش پیدا می‌کند.

مقطع توموگرافی و مدل لیتولوژی سونداژ B با طول تقریباً ۱۰۰۰۰ متر و ۱۸ سونداژ انتخابی برداشت شده است. برای دقت بیشتر و تفسیر بهتر طول نیم‌رخ با ضریب افقی ۰/۱ برابر ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. خطای RMS نیم‌رخ این مدل پس از پنج مرحله تکرار ۴/۷ درصد محاسبه شده است (شکل ۱۰). در این نیم‌رخ تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی از یک تا حدود ۴۰۰ اهم‌متر است. چنانچه در شکل زیر مشاهده می‌شود، در شروع نیم‌رخ مقاومت ویژه الکتریکی زیاد و تا اواسط نیم‌رخ (حدود ۴۸۰ متری) مقاومت ویژه الکتریکی به تدریج کم شده است. پس از آن دوباره مقاومت ویژه الکتریکی نسبتاً زیاد شده است. این تغییرات را می‌توان به عملکرد گسلی مربوط کرد.

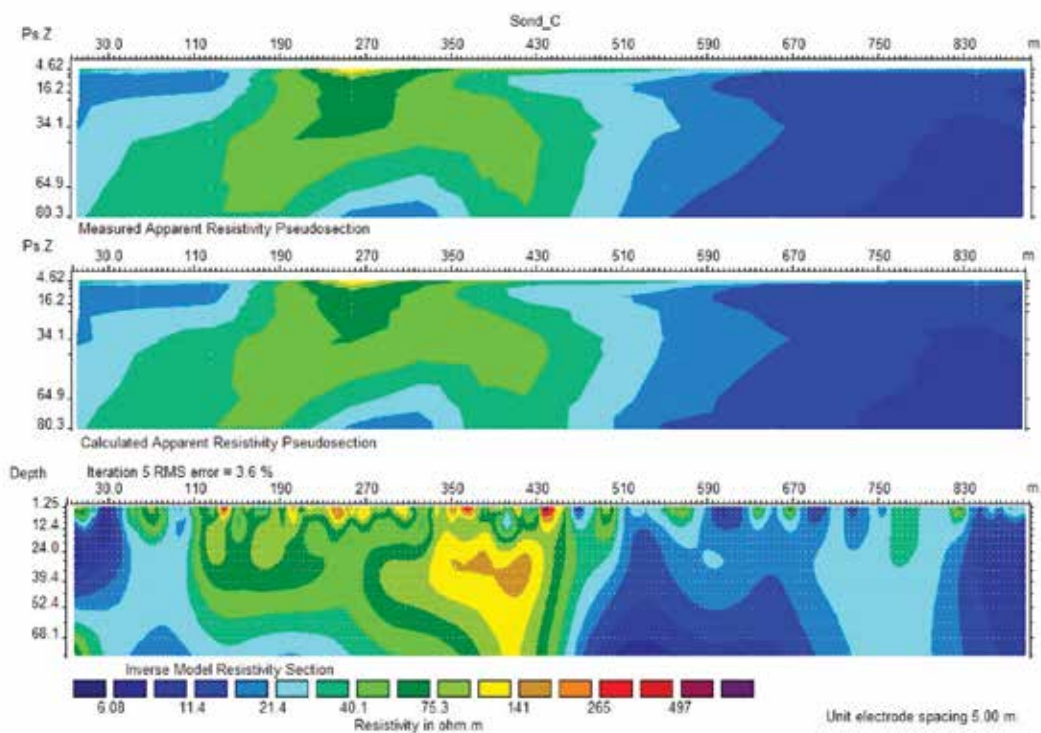


شکل ۹. مقطع توموگرافی نیم‌رخ A-AA

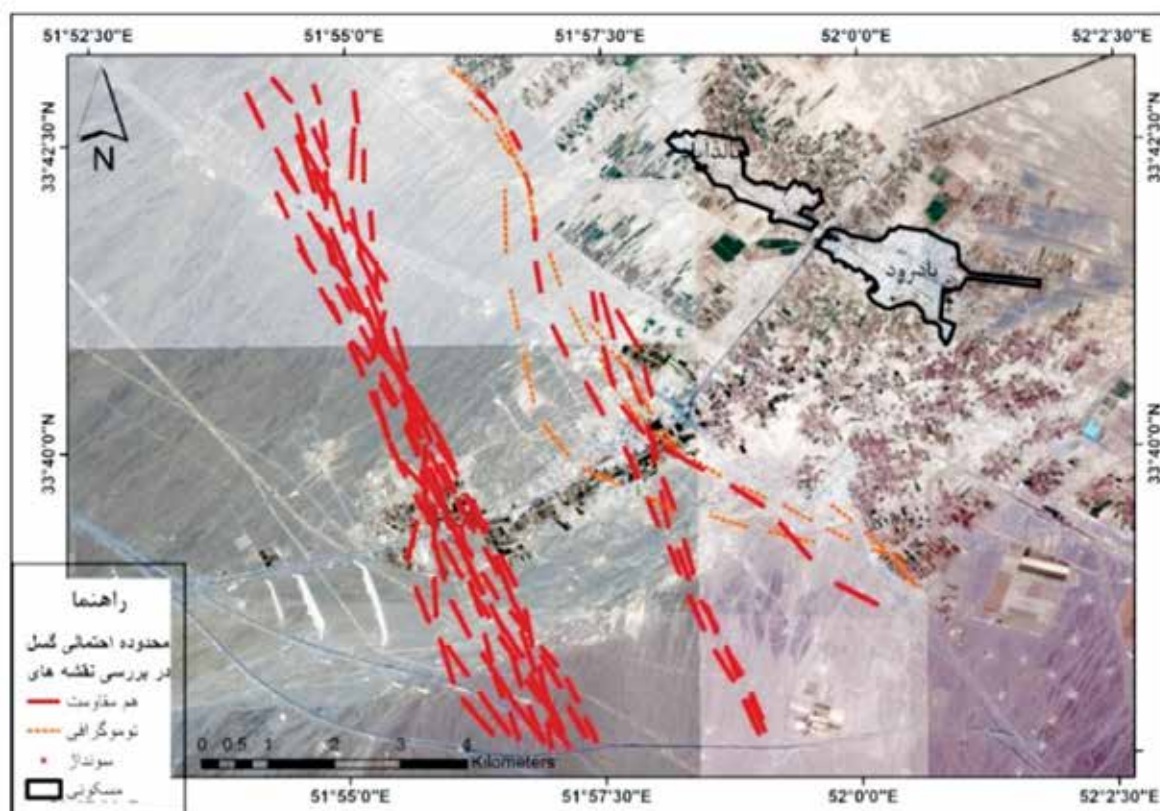
کاربرد توموگرافی ژئوالکتریک در شناسایی تاثیر گسل ها بر هیدروژئولوژی آبخوان آبرفتی بادرود، جنوب شرق کاشان



شکل ۱۰. مقطع توموگرافی نیمرخ B



شکل ۱۱. مدل توموگرافی نیمرخ C



شکل ۱۲. موقعیت گسل‌های احتمالی پهنه مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

مقاومت ظاهری همخوانی دارند که الگوهای متناظری از تغییرات مقاومت (بین دو تا ۱۷۹ اهم-متر) در عمق‌های ۳۰ تا ۳۰۰ متر نشان می‌دهند و کاهش مقاومت به سمت شمال شرقی، نشانگر مرزهای ساختاری مرتبط با گسل می‌باشند. تحلیل‌های هیدروشیمیایی بر اساس ۴۰ نمونه آب زیرزمینی که در دو مرحله جمع‌آوری شدند و با داده‌های کیفی موجود تکمیل شدند و نشان داد، تغییرات مکانی قابل‌توجهی در هدایت الکتریکی (EC)، pH و دما وجود دارد. EC بین ۷۱۷ تا ۶۴۵۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر می‌باشد. مقادیر بالاتر در مناطق جنوب شرقی و جنوب غربی نشان‌دهنده کانی‌سازی ناشی از گسل است. pH بین ۶/۵ تا ۸/۵۶ متغیر است و روند مشخصی ندارد، در حالی که تغییرات دما (۲۱ تا ۲۹ درجه سانتی‌گراد) نشان‌دهنده آنومالی‌های حرارتی محلی به‌ویژه در جنوب شرقی است. این تغییرات هیدروشیمیایی که با جهت جریان

این پژوهش با هدف بررسی ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیک و هیدروشیمیایی آبخوان دشت بادرود در جنوب شرق کاشان، با استفاده از داده‌های ژئوالکتریک و پارامترهای هیدروشیمی انجام شد. بررسی‌های ژئوالکتریک با استفاده از آرایه شلومبرژه و ۶۱ سونداز در سه پروفیل و با فاصله الکتروود جریان حداکثر ۶۰۰ متر، نقشه‌برداری دقیقی از تغییرات مقاومت ویژه زیرسطحی را ممکن ساخت. تفسیر یک‌بعدی داده‌ها با نرم‌افزار IPI2win و توموگرافی الکتریکی دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV، تغییرات ناگهانی و تدریجی در مقاومت ویژه الکتریکی در عمق‌های مختلف را که نشان‌دهنده وجود یک گسل است نشان داد. مقاطع توموگرافی مسیر گسل را تأیید کردند. این مطلب به‌ویژه در پروفیل A-AA در حدود ۳۸۰ متر، پروفیل B در ۴۸۰ متر و پروفیل C در ۴۶۰ متر مشهود است. این یافته‌ها با نقشه‌های

به عنوان پایه‌ای برای مطالعات بیشتر و برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب در مناطق مشابه با شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- آقانباتی، ع، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- درویش‌زاده، ع، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران (چینه‌شناسی، تکنونیک، دگرگونی و ماگماتیسزم)، چاپ اول، انتشارات امیرکبیر، ۴۳۳ص.
- رهگشای، م، ۱۳۷۶. مطالعه آب‌شناسی مناطق با آب‌وهوای خشک تحت شرایط ناپایدار، مدل مطالعاتی: منطقه حاشیه کویر بادرود، طرح مستقل پژوهشی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، نقشه‌های ۱/۱۰۰۰۰ کوه لطیف و نطنز و نقشه ۱/۲۵۰۰۰ کاشان
- شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان. ۱۳۹۶. بانک اطلاعات کمی و کیفی منابع آب
- شیرخانی، ف.، ناصری، ح.، علیجانی، ف. و نجات جهرمی، ز. ۱۴۰۳. مدل‌سازی اثرات کف شکنی چاه‌های بهره‌برداری بر آبخوان باد-خالدآباد، جنوب کاشان، نشریه زمین‌شناسی ایران ۷۰ (۱۸)، ۶۵-۵۱. <https://dorl.net/do/20.1001.1.17357128.1403.18.70.4.3>
- سازمان هواشناسی اصفهان. ۱۳۹۵. بانک اطلاعات کمی و کیفی
- علیجانی، ف.، ناصری، ح.، امیرافضلی، م.، شماسی، ع. ۱۳۹۷. تاثیر گسل دورود بر هیدروژئولوژی آبخوان آبرفتی دشت دورود بروجرد، لرستان. تحقیقات منابع آب ایران ۱۴ (۲)، ۱۶۷-۱۸۱

- Ahmed, A., Salem, H. and El-Kaliouby, B. 2020. Application of electrical resistivity tomography for detecting buried faults in the Nile Delta aquifer, Egypt. Journal of Applied Geophysics, 175, 103914. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103914>.

- Alp, H., Tezel, O., Avcı, K., Vardar, D. and Alp, Y. 2024. Detecting Active Faults Using Electrical Resistivity Tomography: a Case Study in Istanbul, Türkiye. Dokl. Earth Sci-

آب زیرزمینی (جنوب غربی به شمال شرقی) همبستگی ندارند، تأثیر ساختارهای تکتونیکی بر شیمی آبخوان را برجسته می‌کنند. نقشه‌های هم هدایت الکتریکی (EC)، دما و pH آب زیرزمینی نشان‌دهنده تغییرات مکانی قابل توجهی در کیفیت آب هستند، با ناهنجاری‌های ژئوالکتریک هم‌راستا می‌باشند و بر تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی، بر جریان و کیفیت آب‌های زیرزمینی تأکید دارند. به ویژه، افزایش هدایت الکتریکی و تغییرات pH در بخش‌هایی از دشت، احتمال نفوذ آب‌های نیمه‌گرم و شور عمقی را که ناشی از فعالیت گسل‌ها است، تقویت می‌کند.

نتایج حاصل از تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی با آرایه شلومبرژه و توموگرافی دوبعدی، نشان‌دهنده وجود ناهنجاری‌های ساختاری در آبخوان است که با تغییرات ناگهانی و تدریجی مقاومت ویژه در عمق‌های مختلف، مسیرهای احتمالی گسل‌های مدفون در پهنه را مشخص کرد. این گسل‌ها به عنوان عوامل تکتونیکی مؤثر، نقش مهمی در تغییرات هیدروشیمیایی آبخوان ایفا می‌کنند. از این رو گسل‌ها به عنوان مسیرهای ترجیحی یا موانع جریان آب عمل کرده و باعث ایجاد ناهنجاری‌های محلی در آبخوان شده‌اند.

این مطالعه بر اثربخشی ترکیب روش‌های ژئوالکتریک با تحلیل‌های هیدروشیمیایی برای تعیین ساختارهای زیرسطحی و تأثیرات آن‌ها بر سیستم‌های آب زیرزمینی تأکید می‌کند. یافته‌ها پیامدهای مهمی برای مدیریت آب زیرزمینی در ناحیه بادرود دارند و لزوم در نظر گرفتن تأثیرات تکتونیکی در برنامه‌ریزی منابع و ارزیابی کیفیت را برجسته می‌کنند. پژوهش‌های آینده باید بر بررسی‌های ژئوفیزیکی عمیق‌تر برای شناخت سنگ بستر و تعریف دقیق‌تر هندسه گسل، همراه با پایش هیدروشیمیایی مستمر برای ردیابی تغییرات زمانی کیفیت آبخوان متمرکز شوند.

در نهایت، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، مدیریت منابع آب زیرزمینی در دشت بادرود باید با در نظر گرفتن تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی به‌ویژه گسل‌ها صورت گیرد تا از بروز مشکلات کیفی و کمی جلوگیری شود و بهره‌برداری پایدار از این منبع حیاتی تضمین شود. این پژوهش می‌تواند

- ence. 519, 2257-2270. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24603018>
- Bense, V.F., Van den Berg, E.H. and Van Balen, R.T., 2003. Deformation mechanisms and hydraulic properties of fault zones in unconsolidated sediments. the Roer Valley Rift System, The Netherlands. *Hydrogeology Journal*, 11(3), 319-332.
 - Chandra, C.P, 2016. *Groundwater Geophysics in Hard Rock*. First edition, CRC Press/Balkema, 370 .
 - Hosseini, M., Javadi, S. and Kholghi, M., 2020. Hydrogeological and geophysical investigation of groundwater quality in Isfahan plain, Iran. *Environmental Earth Sciences* , 79(10), 234. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08967-8> .
 - Kumar, R., Singh, V. and Kumar, P., 2020. Impact of tectonic structures on groundwater flow and quality in the Indo-Gangetic plains. *Hydrogeology Journal* , 28(4), 1455-1468. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02145-9> .
 - Li, Y., Zhang, X. and Wang, L., 2022. Hydrochemical anomalies caused by buried faults in Yunnan Province, China: A geophysical perspective. *Science of the Total Environment* , 806, 150604. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150604> .
 - Mohammadzadeh, H., Jafari, F. and Moghaddam, A., 2019. Hydrogeological impacts of active and inactive faults in Yazd-Ardakan plain, Iran. *Journal of African Earth Sciences* , 158, 103538. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103538> .
 - Rahimi, A., Asghari-Moghaddam, A. and Zare, M., 2021. Geophysical investigation of buried faults and their impact on groundwater quality in Kermanshah plain, Iran. *Near Surface Geophysics*, 19(2), 123-135. <https://doi.org/10.1002/nsg.12145> .
 - Rajabpour, H., Vaezihir, A. and Sedghi, M.H., 2016. The North Tabriz Fault, a barrier to groundwater flow in an alluvial aquifer northwest of Tabriz, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(10), 1-13.
 - Wang, T., Li, H. and Liu, J., 2021. Electrical resistivity tomography for detecting buried faults in alluvial aquifers: A case study from Japan. *Engineering Geology* , 282, 105994. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.105994> .
 - Yan, Y., Shi, Z., Zhou, X., Wang, G., Zhang, Z., Bai, Y., Zeng, Z., Yao, B., Wang, Y., He, M., Tian, J., Li, R. and Yan, H., 2026. Unraveling stress-mediated fluid-fault interactions in 2021-2022 seismic sequence: Insights from unsupervised machine learning and multiparametric hydrochemical anomalies in Xianshuihe fault zone. *Applied Geochemistry*, Volume 196, 106635, ISSN 0883-2927. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2025.106635>.
 - Zhang, J., Chen, Y. and Wu, Q., 2021. Geophysical identification of buried faults and their hydrochemical impacts in northern China. *Journal of Hydrology* , 594, 125876. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125876> .

ارزیابی ژئوشیمیایی پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند گورپی در حوضه خلیج فارس

صادق براتی بلداجی^۱، ابراهیم سفیداری^{۲*}، هوشنگ مهرابی^۱، سید محمد زمانزاده^۳ و محمد حسن توکل^۴

۱. کارشناس ارشد، گروه زمین‌شناسی نفت، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، سازمان جهاد دانشگاهی شهید بهشتی، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه زمین‌شناسی نفت، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، سازمان جهاد دانشگاهی شهید بهشتی، تهران، ایران

۳. دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴. دکتری سنجش از دور، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، سازمان جهاد دانشگاهی شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰

چکیده

سازند گورپی در حوضه خلیج فارس به دلیل فرآیندهای مختلف زمین‌ساختی و رسوبی، تغییرات ژئوشیمیایی قابل توجهی از شرق به غرب حوضه نشان می‌دهد. این مطالعه بر اساس نتایج حاصل از پیرولیز راک‌ایول و بررسی انعکاس ویتروینایت به بررسی بخش‌های مستعد تولید هیدروکربن سازند گورپی به‌عنوان سنگ منشا احتمالی می‌پردازد. گسترش توزیع مقدار کل کربن آلی برای سازند بیان شده در گستره خلیج فارس نشان می‌دهد، این مقدار در اثر فرآیندهای تکتونیکی قدیمه از قبیل بلندای قدیمه قطر-فارس قرار داشته است. محتوای TOC در امتداد میادین فرزاد C و فروزان به سمت شمال غربی و همچنین به سمت شرق و عمان افزایش می‌یابد.

توزیع میانگین انعکاس ویتروینایت برای سازند گورپی در گستره خلیج فارس نشان می‌دهد، کمترین مقدار بلوغ در محدوده بالآمدگی قطر-فارس قرار می‌گیرد. با حرکت از بلندای قدیمه مذکور به سمت شمال غرب و شرق خلیج فارس مقدار بلوغ افزایش یافته و در شمال غرب به بیشترین مقدار خود می‌رسد که نشان می‌دهد سازند گورپی در ابتدای ورود به پنجره نفت‌زایی قرار دارد.

نتایج این مطالعه آشکار ساخت که سازند مذکور در برخی مناطق، در بالاترین مرحله بلوغ حرارتی خود و در ابتدای پنجره نفتی قرار دارد و در محل تاقدیس‌ها نقش عمده‌ای در تولید هیدروکربن مخازن خلیج فارس بازی نکرده است. نقش این سازند در محدوده ناودیس‌ها و مشارکت هر چند حداقلی در تولید هیدروکربن به‌خصوص در شمال غرب خلیج فارس نیاز به مطالعه بیشتر دارد.

واژه‌های کلیدی: حوضه خلیج فارس، سنگ منشا، گورپی

مقدمه

هیدروکربن و همچنین آشپزخانه نفتی در ارتباط با آن کمک کرده که این کار از اتلاف سرمایه در ادامه عملیات اکتشاف و تولید جلوگیری می‌کند (Hunt, 1996).

حوضه رسوبی خلیج فارس، از غنی‌ترین حوضه‌های هیدروکربنی جهان به شمار می‌آید. این حوضه محصور به خشکی‌های شرق عراق، جنوب و جنوب غرب ایران، شرق عربستان و سواحل امارات متحده عربی، قطر، بحرین و کویت می‌باشد و میادین هیدروکربنی فراوانی را دربر دارد. حوضه خلیج فارس به صورت یک فرونشست تکتونیکی کم عمق می‌باشد (Ghazban, 2007) که با مساحتی در حدود ۲۲۶ هزار کیلومتر مربع (Rabbani, 2013)، در بخش جنوبی چین‌خوردگی زاگرس در اواخر دوره ترشیاری تشکیل شده است. همچنین محور روند اصلی این حوضه در زمان پلیو-پلیستوسن و در اثر چین‌خوردگی زاگرس ایجاد شده است (Ghazban, 2007). ساختار حوضه خلیج فارس نامتقارن است. شیب آن در سواحل ایرانی بیشتر است و همچنین بالاترین عمق این حوضه نیز به سمت ایران است. عمق متوسط خلیج فارس ۳۵ متر و عمیق‌ترین بخش آن در نزدیکی مدخل ورودی تنگه هرمز در حدود ۱۰۰ متر است. در قسمت‌های ایرانی خلیج فارس، تقریباً ۱۵ میلیارد بشکه نفت قابل برداشت، شامل ۱۶ میدان در مخازن کربناته با سن ژوراسیک-کرتاسه و ترشیاری، انباشته شده است (Rabbani, 2013). خلیج فارس به علت لایه‌های رسوبی ضخیم و دارا بودن سنگ‌های منشأ، مخزن و پوش سنگ مناسب، گسترش ناحیه‌ای و موقعیت استراتژیک و شرایط ژئوپلیتیکی خاص یکی از اقتصادی‌ترین حوضه‌های نفت و گاز ایران می‌باشد.

بخشی از نهشته‌های کرتاسه بالایی در حوضه زاگرس را سازند گورپی گویند که در برش الگو از ۳۲۰ متر مارن‌های خاکستری تا آبی رنگ با میان لایه‌های نازک آهک رسی تشکیل شده است (James and Wynd, 1965; Darvishzadeh, 2009). هدف از انجام این مطالعه بررسی توان هیدروکربن‌زایی سازند گورپی به‌عنوان سنگ منشأ احتمالی در حوضه خلیج فارس در میادین فرزاد C، گلشن،

امروزه ژئوشیمی آلی در اکتشاف منابع هیدروکربنی نقش تعیین‌کننده‌ای را ایفا می‌کند. بنابراین اکثر شرکت‌های نفتی، تهیه نمودارهای ژئوشیمیایی را برای اکتشاف و تولید الزامی دانسته و بدون این اطلاعات اقدام به حفاری نمی‌کنند (Ramachandran et al., 2013). با توجه به این که در جریان اکتشاف هیدروکربن بدون اطلاعات ژئوشیمیایی کم و بیش از هر چند حلقه چاه فقط یکی از آن‌ها به نتیجه می‌رسد، می‌توان با داشتن این اطلاعات کاربردی از اتلاف سرمایه‌های عظیم جلوگیری کرد (Han et al., 2015). از آنجایی که علم ژئوشیمی نفت به‌عنوان یک علم نو و بنیادی برای بالا بردن بهره‌وری در اکتشاف و تولید است، بنابراین در سالیان اخیر با به‌کارگیری از تئوری‌ها، ورودی‌های مختلف ژئوشیمیایی، بسیاری از مشکلات مربوط به سنگ منشأ، مهاجرت و تجمع نفت مورد بررسی قرار گرفت (England, 2007; Asadi Mehmandosti et al., 2012). عناصر سنگ منشأ، سنگ مخزن و پوش سنگ و فرآیندهایی همانند زمان زایش، مهاجرت و نحوه به تله افتادن هیدروکربن در شکل‌گیری یک سیستم نفتی نقش اصلی را دارند (Tissot and Welte, 1984; Barati Boldaji et al., 2024). از اصلی‌ترین بخش‌های یک سیستم نفتی سنگ منشأ می‌باشد. بنابراین شناسایی و ارزیابی وسعت آن در هر سیستم نفتی به وسیله ارزیابی ویژگی‌های مواد آلی و یا کروژن ضروری است (Kamali et al., 2006; Bordenave and Hegre, 2010) که شامل شناسایی سنگ‌های منشأ احتمالی از طریق اندازه‌گیری مقدار کل ماده آلی موجود، کمیت و کیفیت و همچنین بلوغ حرارتی ماده آلی است (James and Wynd, 1965). از ساده‌ترین، سریع‌ترین و مهم‌ترین ابزار و روش‌های ژئوشیمیایی برای توصیف توان هیدروکربن‌زایی سنگ‌های منشأ، می‌توان به پیرولیز راک‌ایول اشاره کرد (Hunt, 1996; Behar et al., 2001) که نتایج و اطلاعات مهم و کاربردی از میزان و نوع مواد آلی و همچنین بلوغ حرارتی آن‌ها و پتانسیل باقی مانده نمونه را بیان می‌کند. مطالعه کمیت، کیفیت و بلوغ مواد آلی یک سیستم نفتی، می‌تواند به شناسایی سنگ منشأ مولد

بینک دریایی، خارگ، ماهشهر، توسن، اشکان و فروزان است که با ارزیابی مواد آلی و بلوغ حرارتی (میادین فارور، سلمان، تندر، فارسی، بینک، ماهشهر، اشکان، گورزین، هُلر، هرمز، نصرت، فرزام، سیری، خارگ و فروزان) بررسی می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت میادین مورد مطالعه سازند گورپی در حوضه خلیج فارس

زمین‌شناسی منطقه

از جنبه ساختاری به‌صورت منشوری از ورقه‌های راندگی فلسی می‌باشد و از توالی‌های رسوبی نئوپروتوزوئیک بالایی و فانروزوئیک با ضخامتی در حدود ۷ تا ۱۲ کیلومتر ایجاد شده است (Alavi, 2004).

سازند گورپی در حوضه خلیج فارس به‌دلیل فرآیندهای مختلف زمین‌ساختی و رسوبی، تغییرات زمین‌شناسی قابل توجهی را تجربه کرده و از شرق به غرب حوضه دارای تغییرات اساسی می‌باشد. بررسی تغییرات زمین‌شناسی سازند گورپی در کل حوضه خلیج فارس به افزایش درک تکامل سیستم هیدروکربنی این سازند کمک می‌کند. برخورد سپر عربستان

کمبرند چین‌خورده رانده زاگرس با وسعتی در حدود ۲۰۰۰ کیلومتر از جنوب شرقی ترکیه به شمال سوریه و عراق تا غرب و جنوب غرب ایران، با میادین هیدروکربنی فراوان و عظیم موجود، غنی‌ترین کمربند چین‌خوردگی-راندگی جهان است. این کمربند چین‌خورده و رانده در نتیجه تغییر شکل ساختاری سامانه حاشیه‌ای (پروفورلندی) زاگرس است و شکل حال حاضر آن حوضه خلیج فارس و بین‌النهرین می‌باشد (Alavi, 2004).

این کمربند کوهزایی نتیجه برخورد ورقه‌ای آفریقایی-عربی و ورقه ایران است (Berberian and King, 1981).

شبه جزیره عربستان، سازند گورپی حرکات زمین‌ساختی ملایم‌تری را نسبت به شرق تجربه می‌کند، در نتیجه دارای لایه‌های رسوبی گسترده‌تر و یکنواخت‌تر می‌باشد و لایه‌های رسوبی بیشتر در مقایسه با ضلع شرقی نازک‌تر با غلبه رسوبات آواری هستند. این تغییر به دلیل نزدیکی به سپر عربی و تاثیر سیستم‌های رودخانه‌ای است و مقادیر قابل توجهی از رسوبات آواری را حمل کرده‌اند. زمین‌شناسی منطقه غربی با ماسه سنگ‌ها، سیلت سنگ‌ها و شیل‌ها مشخص می‌شود و منعکس کننده یک محیط رسوبی دلتایی یا رودخانه‌ای است (Konyuhov and Maleki, 2006).

به طور کلی، زمین‌شناسی سازند گورپی منعکس کننده یک روند از رسوبات کربنات ضخیم در شرق به لایه‌های نازک با غلبه آواری در غرب است که توسط فرآیندهای تکتونیکی و رسوبی متفاوت در سراسر خلیج فارس شکل گرفته و منعکس کننده تغییرات در محیط‌های رسوبی، از محیط‌های دریایی کم عمق به محیط‌های دلتایی و رودخانه‌ای می‌باشد. همچنین، منابع هیدروکربنی در این سازند در اثر فعالیت‌های تکتونیکی عمدتاً به صورت جانبی از شرق به غرب مهاجرت می‌کنند و به طور متوالی تله‌های بالقوه را در طول مسیر شارژ کرده‌اند (شکل ۲) (Talaie et al., 2023).

روش مطالعه

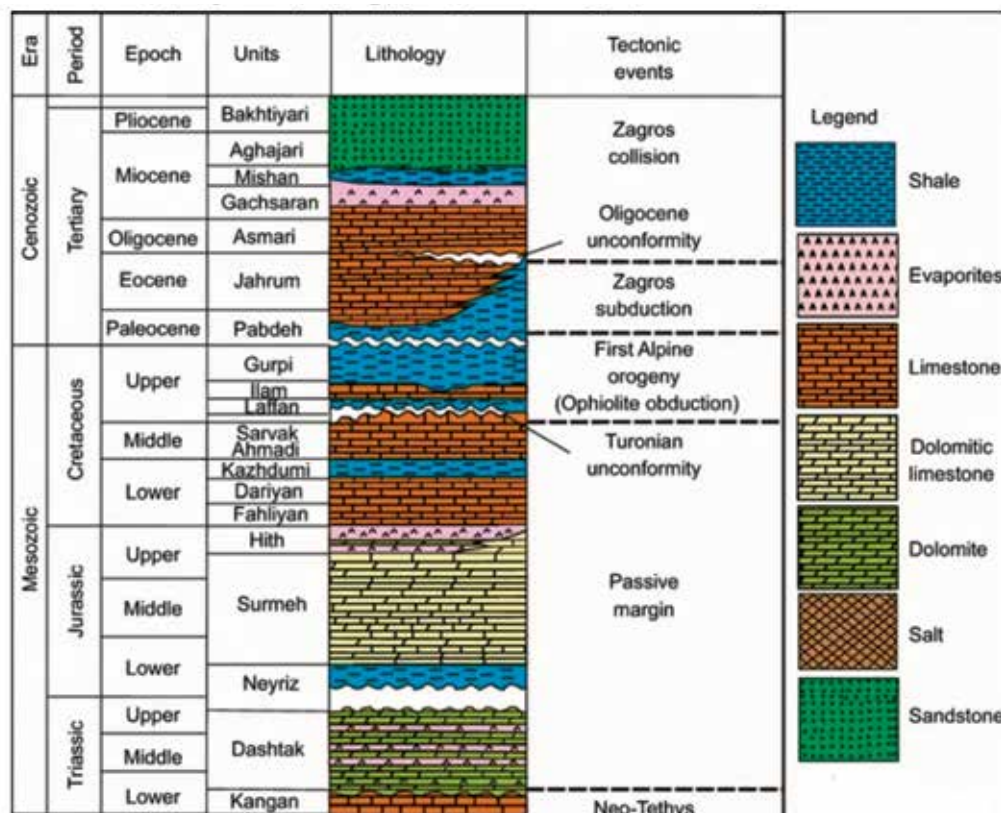
در این مطالعه به بررسی ارزیابی توان هیدروکربن‌زایی سازند گورپی در حوضه خلیج فارس، شامل ۸ میدان فرزاد C، گلشن، بینک دریایی، خارگ، ماهشهر، توسن، اشکان و فروزان با استفاده از نتایج پیرولیز راک‌ایول ۶ و همچنین ۱۵ میدان فارور، سلمان، تندر، فارسی، بینک، ماهشهر، اشکان، گورزین، هُلر، هرمز، نصرت، فرزام، سیری، خارگ و فروزان برای بررسی انعکاس ویترونیات و تعیین نقاط مستعد تولید هیدروکربن پرداخته می‌شود.

پیرولیز راک‌ایول

آنالیز پیرولیز راک‌ایول، علاوه بر این که در حوضه اکتشاف نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد، امروزه کاربرد زیادی در ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازندها دارد

و بلوک ایران در مرز مزوزوئیک/سنوزوئیک منجر به تشکیل کمربند چین‌خورده زاگرس و پیش حوضه بین النهرین شده است، به صورتی که حوضه خلیج فارس و سازند گورپی در محل اتصال این صفحات تشکیل شده است. در سرتاسر دوره فانروزوئیک، حوضه خلیج فارس بخشی از حاشیه غیر فعال گندوانا است و منجر به تجمع لایه‌های رسوبی ضخیم کربناته و تبخیری شده است. در دوره پلیستوسن، سطح دریا به طور قابل توجهی کاهش یافت و باعث فرسایش دره‌های رودخانه‌ها و تشکیل سکوه‌های دریایی شد. این فرآیندهای زمین‌شناسی، در مجموع سازند گورپی و حوضه وسیع‌تر خلیج فارس را شکل داده‌اند. حرکات تکتونیکی از جمله چین‌خوردگی، گسلش و دیاپیرسم نمکی باعث تغییرات در توپوگرافی حوضه و در نتیجه بر رسوبات و ضخامت سازند گورپی شده است (Kassler, 1973).

تغییرات محیط رسوبی سازند گورپی از شرق به غرب نشان‌دهنده محیط‌های دریایی مختلف، از محیط‌های ساحلی کم‌عمق گرفته تا مناطق حوضه‌ای عمیق‌تر می‌باشد. این سازند در شرق خلیج فارس بیشتر از سنگ‌های کربناته شامل سنگ‌آهک و دولومیت تشکیل شده که نشان‌دهنده وجود یک محیط دریایی کم عمق در دوره کرتاسه پسین است (Alipour et al., 2021). با توجه به خواص مخزنی بسیار خوب سنگ‌های کربناته در این بخش و فعالیت تکتونیکی بالا که منجر به ایجاد تله‌های ساختاری متعددی شده است، این بخش شاهد مخازن هیدروکربنی بالایی می‌باشد. با حرکت به سمت غرب (خلیج فارس مرکزی)، سنگ‌شناسی سازند گورپی با حفظ غلبه کربنات‌ها، پیچیده‌تر شده و لایه‌های شیلی و مارن بین لایه‌ای به آن افزوده می‌شود. این منطقه به دلیل نوسانات سطح دریا و فرونشست زمین‌ساختی، محیط رسوبی متفاوتی را تجربه کرده است. وجود شیل‌ها و مارن‌ها نشان‌دهنده دوره‌های کاهش تولید کربنات است که احتمالاً به دلیل شرایط آب عمیق‌تر یا افزایش ورودی سیلیس آواری است. منطقه مرکزی همچنین شواهدی از تغییرات دیاژنتیکی، مانند دولومیتی شدن و سیمان شدن را نشان می‌دهد و می‌تواند بر کیفیت مخزن تاثیر بگذارد. در بخش غربی خلیج فارس، نزدیک



شکل ۲. ستون چینه‌شناسی کلی، از بخش ایرانی خلیج فارس (Mashhadi et al., 2015)

روش‌ها برای ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی سنگ منشأ به‌شمار می‌آید، استفاده می‌شود (Behar et al., 2001). پیرولیز، حرارت دادن مواد آلی در نبود اکسیژن، برای تولید و آزاد شدن هیدروکربن از ماده آلی و همچنین پتانسیل هیدروکربن‌زایی باقی مانده در درجه حرارت‌های بالا و در مدت زمان کوتاه می‌باشد و به نوعی، تداعی کننده تولید هیدروکربن در مرحله کاتارز می‌باشد (Barker, 1974). از آنجایی که اولین قدم در ارزیابی‌های ژئوشیمیایی انتخاب و آماده‌سازی نمونه است، در این مطالعه هم این فرآیند برای آنالیز پیرولیز راکایول و سنجش میزان TOC و T_{max} انجام شده است. در این پژوهش سعی شده که نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شود که کل حوضه خلیج فارس را پوشش دهد.

پارامترهای اندازه‌گیری شده راکایول شامل پیک‌های S1 (هیدروکربن آزاد موجود در سنگ)، S2 (هیدروکربن تولیدی حاصل از پیرولیز)، S3 (ترکیبات اکسیژن‌دار موجود در کروزن) و T_{max} (دمای بیشینه تولید S2) می‌باشد.

1. Total Organic Carbon: TOC

(Espitalié et al., 1984; Behar et al., 2001; Kobraei et al., 2019). همچنین پیرولیز راکایول، سریع‌ترین و ساده‌ترین روش برای توصیف هیدروکربن‌زایی سنگ‌های منشأ می‌باشد (Page and Kuhnel, 1980; Hunt, 1996). روش پیرولیز راکایول به‌صورت حرارت دادن ماده آلی در نبود اکسیژن است که برای تولید و آزاد شدن هیدروکربن از مواد آلی موجود انجام می‌شود (Barker, 1974). این روش به‌دلیل ساده و ارزان بودن و همچنین نیاز نداشتن به صرف مدت زمان زیاد برای اینکار، روش مناسبی برای ارزیابی سنگ منشأ است (Kamali and Ghorbani, 2006; Sfidari, 2024) که اطلاعات مهمی از نوع مواد آلی، کل کربن آلی (بر حسب درصد وزنی)، پتانسیل باقی مانده و تحول حرارتی مواد آلی را به ما نشان می‌دهد. از خرده‌های حفاری، مغزه‌ها و یا نمونه‌های سطحی برای انجام آنالیزهای ژئوشیمیایی می‌توان استفاده کرد (Bordenave, 1993).

به‌منظور دستیابی به اطلاعات ژئوشیمیایی از دستگاه پیرولیز راکایول ۶ که به‌علت بالا بودن دقت آنالیز از بهترین

S3 (برحسب میلی گرم دی اکسید کربن بر گرم سنگ) بیان می‌شود (Behar et al., 2001; Sfidari, 2024). این پارامتر کمیت مواد آلی موجود در نمونه‌ها را برای ارزیابی بیشتر بیان می‌کند. مواد آلی باقی مانده در سنگ در آون اکسیداسیون با نرخ ۲۰ درجه سانتی‌گراد در هر دقیقه تا دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت می‌بیند و پارامترهای دیگری اندازه‌گیری می‌شود. مقدار کربن پسمانده یا پارامتر S4 در سیستم اکسیداسیون اندازه‌گیری می‌شود (Rabbani, 2013).

این آنالیزها بر روی نمونه‌های مورد مطالعه از میداین فرزاد C، گلشن، بینک دریایی، خارگ، ماهشهر، توسن، اشکان و فروزان در خلیج فارس برای ارزیابی توان هیدروکربن‌زایی، تعیین نوع کروژن و میزان پختگی و تعیین میزان بلوغ مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه تعداد ۴۳ نمونه خرده حفاری از سازند گورپی با استفاده از روش پیرولیز راکایول برای رسیدن به پارامترهای کمیت، کیفیت و بلوغ مورد ارزیابی ژئوشیمیایی قرار گرفت. نتایج آنالیز راکایول در جدول ۱ آورده شده است.

اندازه‌گیری انعکاس ویتترینایت

ویتترینایت یک نوع ماسرال در سنگ‌های منشا، با منشا خشکی است که با بالا رفتن درجه بلوغ میزان انعکاس نور از سطح صیقلی شده ویتترینایت بیشتر می‌شود. بنابراین از بهترین روش‌های شناسایی اندازه بلوغ سنگ منشا می‌توان به انعکاس ویتترینایت اشاره کرد (Hunt, 1996; Dembicki, 2022). با استفاده از میکروسکوپ نوری انعکاسی^۵ مجهز به تجهیزات فتومالیتی‌پلایر^۶ و یک سیستم کامپیوتری متصل به آن و به روش اندازه‌گیری غوطه‌ور در روغن اندازه‌گیری مقادیر انعکاس ویتترینایت انجام می‌شود. در آغاز کار باید میکروسکوپ را کالیبره کرد که از قرص‌های استاندارد شیشه‌ای برای این کار استفاده می‌شود. سپس یک باریکه‌ای

همچنین پارامترهای دیگری همچون TOC، اندیس هیدروژن^۱ (که معرف مقدار هیدروکربنی است که می‌تواند با توجه به مقادیر مواد آلی موجود در سنگ منشا تولید شود)، اندیس اکسیژن^۲ (که بیانگر مقدار دی اکسید کربن تولید شده با توجه به مقدار ماده آلی موجود در سنگ منشا می‌باشد)، اندیس تولید^۳ (که نشان‌دهنده مقدار هیدروکربن تولید شده از سنگ منشا نسبت به کل هیدروکربنی است که سنگ منشا توانایی تولید داشته) و پتانسیل هیدروکربن‌زایی^۴ از نتایج پیک‌های اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شوند (Espitalié et al., 1977; Behar et al., 2001; Hosseiny and Barati Boldaji, 2020; Dembicki, 2022).

دستگاه راکایول ۶ از کوره‌های پیرولیز و اکسیدان تشکیل شده است. پتانسیل تولید هیدروکربن نمونه‌های آماده شده به کمک کوره پیرولیز در شرایط محیطی خنثی و افزایش دما با یک برنامه حرارتی خاص، مورد بررسی قرار می‌گیرد (Barker, 1974; Barati Boldaji et al., 2024). در این روش آنالیز، حدود ۷۰ میلی گرم نمونه پودر شده از سنگ مورد مطالعه در یک محیط اتمسفری نیتروژن برای مشخص نمودن مقدار هیدروکربن‌های آزاد موجود در سنگ که با پیک S1 و همچنین پتانسیل باقی‌مانده که در صورت بالغ شدن توانایی تولید هیدروکربن را دارد که با پیک S2 بیان می‌شود تا دمای ۶۵۰ درجه با نرخ ۲۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه در آون پیرولیز در معرض حرارت قرار می‌گیرد. مقادیر هیدروکربن‌هایی که تا حرارت ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد آزاد شده تحت عنوان پارامتر S1 (برحسب میلی گرم هیدروکربن بر گرم سنگ) بیان می‌شود. همچنین در اثر افزایش حرارت، مواد آلی موجود در سنگ در اثر پیرولیز تبدیل به هیدروکربن شده و با پارامتر S2 (برحسب میلی گرم هیدروکربن بر گرم سنگ) اندازه‌گیری می‌شود. T_{max} ، درجه حرارتی است که در آن درجه بالاترین مقدار هیدروکربن تولید می‌شود و یک پارامتر مهم در ارزیابی بلوغ مواد آلی موجود در سنگ مورد مطالعه است. در دمای ۳۰۰ تا ۳۹۰ درجه سانتی‌گراد گروه‌های کربوکسیلی موجود در کروژن سنگ شکسته شده و به صورت CO_2 آزاد می‌شود که با پارامتر

1. Hydrogen Index: $HI=100*S2/TOC$
2. Oxygen Index: $OI=100*S3/TOC3$.
3. Production Index: $PI=S1/(S1+S2)$
4. Petroleum Potential: $PP=S1+S2$
5. Reflected Light Microscope
6. Photomultiplier

جدول ۱. نتایج آنالیز پیرولیز راک ایول نمونه‌های سازند گورپی در میادین مورد مطالعه حوضه خلیج فارس

Field	Depth (m.)	Petroleum potential (quantity)				Kerogen type (quality)		Thermal maturity		S1/TOC
		TOC	S1	S2	PP	HI	OI	T _{max}	PI	
FARZAD C	۱۹۱۴-۱۷	۰/۲۰	۰/۲۹	۰/۳۱	۰/۶۰	۱۵۵	۲۶۰	۴۲۳	۰/۴۸	۱/۴۵
	۱۹۸۱-۸۷	۰/۳۱	۰/۴۳	۰/۵۱	۰/۹۴	۱۶۵	۳۳۹	۴۲۴	۰/۴۶	۱/۳۹
	۲۰۰۶-۰۹	۲/۹۴	۲/۱۲	۴/۵۹	۶/۷۱	۱۵۶	۵۹	۴۱۳	۰/۳۲	۰/۷۲
	Max	۲/۹۴	۲/۱۲	۴/۵۹	۶/۷۱	۱۶۵	۳۳۹	۴۲۴	۰/۴۸	۱/۴۵
	Ave	۱/۱۵	۰/۹۵	۱/۸۰	۲/۷۵	۱۵۹	۲۱۹	۴۲۰	۰/۴۲	۱/۱۹
	Min	۰/۲۰	۰/۲۹	۰/۳۱	۰/۶۰	۱۵۵	۵۹	۴۱۳	۰/۳۲	۰/۷۲
	۷۵۰-۶۰	۰/۴۲	۰/۲۷	۱/۲۱	۱/۴۸	۲۸۸	۲۶۹	۴۵۲	۰/۱۸	۰/۶۴
GOLSHAN	۷۶۵-۷۰	۰/۴۲	۰/۳۹	۰/۵۵	۰/۹۴	۱۳۱	۳۱۰	۴۲۴	۰/۴۱	۰/۹۳
	۷۷۵-۸۰	۰/۴۵	۰/۴۰	۰/۸۰	۱/۲۰	۱۷۸	۲۹۳	۴۵۱	۰/۳۳	۰/۸۹
	۶۰۰	۱/۷۳	۰/۲۷	۲/۳۰	۲/۵۷	۱۳۳	۷۵	۴۲۱	۰/۱۱	۰/۱۶
	Max	۱/۷۳	۰/۴۰	۲/۳۰	۲/۵۷	۲۸۸	۳۱۰	۴۵۲	۰/۴۱	۰/۹۳
	Ave	۰/۷۶	۰/۳۳	۱/۲۲	۱/۵۵	۱۸۳	۲۳۷	۴۳۷	۰/۲۶	۰/۶۵
	Min	۰/۴۲	۰/۲۷	۰/۵۵	۰/۹۴	۱۳۱	۷۵	۴۲۱	۰/۱۱	۰/۱۶
	۲۶۴۶-۵۰	۰/۲۶	۰/۲۳	۰/۳۴	۰/۵۷	۱۳۱	۳۳۸	۴۳۴	۰/۴۰	۰/۸۸
BINAK MARIN	۲۶۶۴-۶۸	۰/۲۸	۰/۳۵	۰/۳۸	۰/۷۳	۱۳۶	۴۲۱	۴۳۱	۰/۴۸	۱/۲۵
	۲۶۹۰-۹۴	۰/۵۴	۰/۳۸	۱/۸۵	۲/۲۳	۳۴۳	۱۷۲	۴۳۲	۰/۱۷	۰/۷۰
	۲۷۱۰-۱۴	۱/۲۸	۰/۵۳	۵/۴۸	۶/۰۱	۴۲۸	۷۷	۴۲۹	۰/۰۹	۰/۴۱
	۲۷۲۵-۳۴	۰/۵۹	۰/۴۵	۱/۸۷	۲/۳۲	۳۱۷	۲۴۶	۴۳۰	۰/۱۹	۰/۷۶
	۲۷۵۲-۶۰	۰/۴۳	۰/۳۹	۱/۲۷	۱/۶۶	۲۹۵	۳۹۳	۴۳۱	۰/۲۳	۰/۹۱
	۲۷۷۰-۷۴	۰/۳۸	۰/۳۵	۱/۲۲	۱/۵۷	۳۲۱	۲۸۹	۴۳۲	۰/۲۲	۰/۹۲
	۲۷۹۰-۹۴	۰/۳۸	۰/۳۳	۰/۹۰	۱/۲۳	۲۳۷	۳۱۳	۴۳۲	۰/۲۷	۰/۸۷
	۲۸۱۶-۲۴	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۷۳	۱/۰۴	۲۰۹	۳۶	۴۳۳	۰/۳۰	۰/۸۹
	۲۸۴۶-۵۰	۰/۴۸	۰/۳۸	۱/۰۴	۱/۴۲	۲۱۷	۲۴۴	۴۳۵	۰/۲۷	۰/۷۹
	۲۸۶۰-۷۰	۰/۷۲	۰/۶۱	۱/۷۷	۲/۳۸	۲۴۶	۳۰۸	۴۳۵	۰/۲۶	۰/۸۵
	۲۸۸۰-۸۴	۰/۸۶	۰/۷۷	۲/۵۰	۳/۲۷	۲۹۱	۲۴۵	۴۳۳	۰/۲۴	۰/۹۰
	Max	۱/۲۸	۰/۷۷	۵/۴۸	۶/۰۱	۴۲۸	۴۲۱	۴۳۵	۰/۴۸	۱/۲۵
	Ave	۰/۵۵	۰/۴۲	۱/۶۱	۲/۰۴	۲۶۴	۲۵۷	۴۳۲	۰/۲۶	۰/۸۴
	Min	۰/۲۶	۰/۲۳	۰/۳۴	۰/۵۷	۱۳۱	۳۶	۴۲۹	۰/۰۹	۰/۴۱
	۲۵۵۸	۰/۷۷	۰/۵۱	۲/۷۴	۳/۲۵	۳۵۶	۱۶۱	۴۲۰	۰/۱۶	۰/۶۶
KHARG	۲۵۶۰-۶۲	۰/۶۲	۰/۳۲	۱/۸۹	۲/۲۱	۳۰۵	۱۹۷	۴۲۳	۰/۱۴	۰/۵۲
	۲۵۶۶	۰/۷۳	۰/۴۳	۱/۹۹	۲/۴۲	۲۷۳	۱۳۳	۴۲۳	۰/۱۸	۰/۵۹
	۲۵۷۴	۰/۵۷	۰/۴۲	۱/۹۶	۲/۳۸	۳۴۴	۱۹۸	۴۲۵	۰/۱۸	۰/۷۴
	۲۵۷۸	۰/۴۸	۰/۳۵	۱/۴۱	۱/۷۶	۲۹۴	۱۸۱	۴۱۵	۰/۲۰	۰/۷۳
	Max	۰/۷۷	۰/۵۱	۲/۷۴	۳/۲۵	۳۵۶	۱۹۸	۴۲۵	۰/۲۰	۰/۷۴
	Ave	۰/۶۳	۰/۴۱	۲/۰۰	۲/۴۰	۳۱۴	۱۷۴	۴۲۱	۰/۱۷	۰/۶۵
	Min	۰/۴۸	۰/۳۲	۱/۴۱	۱/۷۶	۲۷۳	۱۳۳	۴۱۵	۰/۱۴	۰/۵۲

ادامه جدول ۱.

Field	Depth (m.)	Petroleum potential (quantity)				Kerogen type (quality)		Thermal maturity		S1/TOC
		TOC	S1	S2	PP	HI	OI	T _{max}	PI	
MAHSHAHR	۳۰۵۲	۰/۴۹	۰/۵۰	۰/۵۶	۱/۰۶	۱۱۴	۲۲۴	۴۲۴	۰/۴۷	۱/۰۲
	۳۰۷۰	۰/۴۹	۰/۴۳	۰/۷۷	۱/۲۰	۱۵۷	۲۳۷	۴۲۷	۰/۳۶	۰/۸۸
	۳۱۵۰	۰/۶۱	۰/۶۸	۱/۲۱	۱/۸۹	۱۹۸	۲۰۰	۴۳۰	۰/۳۶	۱/۱۱
	۳۱۸۲	۰/۸۷	۰/۶۷	۲/۵۳	۳/۲۰	۲۹۱	۱۶۹	۴۳۰	۰/۲۱	۰/۷۷
	Max	۰/۸۷	۰/۶۸	۲/۵۳	۳/۲۰	۲۹۱	۲۳۷	۴۳۰	۰/۴۷	۱/۱۱
	Ave	۰/۶۲	۰/۵۷	۱/۲۷	۱/۸۴	۱۹۰	۲۰۸	۴۲۸	۰/۳۵	۰/۹۵
	Min	۰/۴۹	۰/۴۳	۰/۵۶	۱/۰۶	۱۱۴	۱۶۹	۴۲۴	۰/۲۱	۰/۷۷
TOUSAN	۳۰۵۴-۶۲	۰/۳۹	۰/۲۵	۰/۳۴	۰/۵۹	۸۷	۷۳۸	۴۱۷	۰/۴۲	۰/۶۴
	۳۰۸۴-۹۲	۰/۲۴	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۳۲	۷۵	۷۷۵	۴۲۶	۰/۴۳	۰/۵۸
	۳۱۰۴-۱۰	۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۲۸	۰/۴۵	۱۲۷	۹۰۹	۴۲۳	۰/۳۸	۰/۷۷
	۳۱۶۰-۷۰	۰/۶۳	۰/۴۸	۰/۹۲	۱/۴۰	۱۴۶	۵۳۷	۴۲۶	۰/۳۴	۰/۷۶
	۳۲۵۰-۵۶	۰/۱۷	۰/۲۳	۰/۵۷	۰/۸۰	۳۳۵	۱۲۲۹	۵۹۵	۰/۲۹	۱/۳۵
	۳۳۱۴-۲۲	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۳۳	۸۶	۹۱۴	۴۳۴	۰/۴۵	۰/۷۱
	۳۳۳۸-۴۶	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۴۹	۱۳۷	۱۸۴	۴۳۶	۰/۴۷	۱/۲۱
	Max	۰/۶۳	۰/۴۸	۰/۹۲	۱/۴۰	۳۳۵	۱۲۲۹	۵۹۵	۰/۴۷	۱/۳۵
	Ave	۰/۲۹	۰/۲۴	۰/۳۹	۰/۶۳	۱۴۲	۷۵۵	۴۵۱	۰/۴۰	۰/۸۶
	Min	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۳۲	۷۵	۱۸۴	۴۱۷	۰/۲۹	۰/۵۸
Ashkan	۲۹۴۰-۵۰	۰/۶۷	۰/۵۰	۱/۴۴	۱/۹۴	۲۱۵	۲۱۲	۴۳۰	۰/۲۶	۰/۷۵
	۲۹۷۰-۸۰	۰/۵۰	۰/۳۳	۰/۸۴	۱/۱۷	۱۶۸	۲۷۸	۴۳۲	۰/۲۸	۰/۶۶
	۲۹۹۰-۳۰۰۰	۰/۷۴	۰/۴۸	۱/۲۶	۱/۷۴	۱۷۰	۲۱۲	۴۲۸	۰/۲۸	۰/۶۵
	۳۰۲۰-۳۰	۰/۷۲	۰/۴۰	۱/۵۱	۱/۹۱	۲۱۰	۲۱۷	۴۳۲	۰/۲۱	۰/۵۶
	۳۰۵۰-۶۰	۰/۷۹	۰/۵۱	۱/۸۹	۲/۴۰	۲۳۹	۱۹۷	۴۳۰	۰/۲۱	۰/۶۵
	Max	۰/۷۹	۰/۵۱	۱/۸۹	۲/۴۰	۲۳۹	۲۷۸	۴۳۲	۰/۲۸	۰/۷۵
	Ave	۰/۶۸	۰/۴۴	۱/۳۹	۱/۸۳	۲۰۰	۲۲۳	۴۳۰	۰/۲۵	۰/۶۵
	Min	۰/۵۰	۰/۳۳	۰/۸۴	۱/۱۷	۱۶۸	۱۹۷	۴۲۸	۰/۲۱	۰/۵۶
	۱۷۳۸-۳۹	۱/۱۱	۰/۵۳	۲/۶۱	۳/۱۴	۲۳۵	۱۳۸	۴۳۱	۰/۱۷	۰/۴۸
	۱۷۴۴-۴۵	۱/۲۹	۰/۵۶	۴/۳۹	۴/۹۵	۳۴۰	۸۱	۴۲۷	۰/۱۱	۰/۴۳
Foroozan	۱۷۴۷-۴۸	۰/۹۷	۰/۵۱	۲/۶۹	۳/۲۰	۲۷۷	۱۲۴	۴۲۹	۰/۱۶	۰/۵۳
	Max	۱/۲۹	۰/۵۶	۴/۳۹	۴/۹۵	۳۴۰	۱۳۸	۴۳۱	۰/۱۷	۰/۵۳
	Ave	۱/۱۲	۰/۵۳	۳/۲۳	۳/۷۶	۲۸۴	۱۱۴	۴۲۹	۰/۱۵	۰/۴۸
	Min	۰/۹۷	۰/۵۱	۲/۶۱	۳/۱۴	۲۳۵	۸۱	۴۲۷	۰/۱۱	۰/۴۳

ویترینایت^۱ بیان می‌شود (Sfidari, 2024; Barati Boldaji et al., 2024).

تعداد ۵۱ نمونه خرده حفاری جدید و قدیمی از سازند گورپی از میادین فارور، سلمان، تندر، فارسی، بینک، ماهشهر، اشکان، گورزین، هُلر، هرمز، نصرت، فرزام، سیری،

از نور کالیبره شده را به سطح ویترینایت تابانده و مقدار نوری که انعکاس پیدا می‌کند توسط بخش فتومالی‌پلیر ثبت و به رایانه ارسال می‌شود. به‌طور معمول بیش از ۳۰ تا ۱۰۰ عدد اندازه‌گیری برای هر نمونه باید انجام شود. در آخر میانگین مقادیر خوانده شده برای هر مقطع به‌عنوان درجه انعکاس

1. Vitrinite Reflectance: Ro%

خارگ و فروزان در حوضه خلیج فارس برای اندازه‌گیری انتخاب شده است. نتایج این اندازه‌گیری‌ها بر حسب مقادیر ضریب انعکاس ویترینایت و بررسی بلوغ حرارتی این سازند میانگین انعکاس ویترینایت در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مقادیر میانگین انعکاس ویترینایت اندازه‌گیری شده بر روی نمونه‌های سازند گورپی در میادین مورد مطالعه حوضه خلیج فارس

Field	Depth (m.)	Number of reading	%Ro			Data source
			Min	Ave	Max	
Farur	۱۶۸۷/۰۵	۹	۰/۲۰	۰/۳۷	۰/۶۹	Old data
Farur	۱۷۳۲/۸	۸	۰/۲۱	۰/۴۴	۰/۵۹	Old data
Salman	۱۲۹۷/۵	-	-	۰/۲۸	-	Old data
Tondar	۱۶۵۳/۵	-	-	۰/۳۳	-	Old data
Farsi	۱۹۸۴/۲۵	۹	۰/۱۸	۰/۲۷	۰/۳۶	Old data
Farsi	۲۰۰۱/۰۲	۴۶	۰/۱۰	۰/۳۷	۰/۵۳	Old data
Farsi	۲۰۲۵/۴۱	۱۰	۰/۳۵	۰/۴۹	۰/۷۶	Old data
Farsi	۲۰۴۹/۸	۹	۰/۲۰	۰/۳۸	۰/۵۸	Old data
Binak	۲۶۴۸	۴	۰/۲۱	۰/۳۴	۰/۴۵	Old data
Binak	۲۶۹۲	۱۱	۰/۲۱	۰/۳۱	۰/۴۵	Old data
Binak	۲۷۱۲	۷	۰/۳۴	۰/۴۱	۰/۵۳	Old data
Binak	۲۷۵۶	۱۰	۰/۳۰	۰/۴۲	۰/۶۱	Old data
Binak	۲۷۹۲	۸	۰/۲۸	۰/۴۱	۰/۵۷	Old data
Binak	۲۸۶۵	۳	۰/۴۸	۰/۵۷	۰/۶۲	Old data
Mahshahr	۳۱۰۰	۶	۰/۲۲	۰/۴۹	۰/۷۲	Old data
Mahshahr	۳۱۸۲	۷	۰/۲۶	۰/۳۹	۰/۷۴	Old data
Ashkan	۲۹۹۵	-	-	۰/۲۸	-	Old data
Ashkan	۳۱۰۵	-	-	۰/۵۸	-	Old data
Ashkan	۳۲۸۵	-	-	۰/۴۱	-	Old data
Gavarzin	۲۵۹۳	-	-	۰/۳۱	-	Old data
Gavarzin	۲۷۴۶	-	-	۰/۳۸	-	Old data
Hulur	۲۷۶۰	-	-	۰/۳۹	-	Old data
Hulur	۲۸۳۰	-	-	۰/۳۹	-	Old data
Hulur	۲۸۷۵/۵	-	-	۰/۵۳	-	Old data
Hormoz	۲۲۳۵/۵	۱	-	۰/۳۷	-	Old data
Hormoz	۲۲۸۵/۵	۱	-	۰/۴۰	-	Old data
Hormoz	۲۳۹۹/۵	۱	-	۰/۳۰	-	Old data
Nosrat	۲۶۴۹	۱۴	۰/۳۰	۰/۴۴	۰/۵۶	New data
Nosrat	۲۶۸۹	۱۲	۰/۲۹	۰/۴۱	۰/۵۷	New data
Nosrat	۲۷۴۸/۵	۱۱	۰/۳۱	۰/۴۶	۰/۶۰	New data
Nosrat	۲۷۶۸	۸	۰/۳۲	۰/۴۷	۰/۶۰	New data
Nosrat	۲۷۹۲/۵	۱۷	۰/۲۹	۰/۴۸	۰/۶۰	New data
Nosrat	۲۷۱۸/۵	۲۰	۰/۳۰	۰/۵۰	۰/۶۲	New data
Nosrat	۲۸۳۰/۵	۱۹	۰/۲۹	۰/۵۲	۰/۶۲	New data
Nosrat	۲۸۴۸	۲۰	۰/۳۳	۰/۵۱	۰/۶۴	New data
Nosrat	۲۸۶۵/۵	۲۳	۰/۳۳	۰/۵۳	۰/۶۳	New data
Nosrat	۲۸۷۶/۵	۱۲	۰/۳۹	۰/۵۳	۰/۶۳	New data

ادامه جدول ۲.

Field	Depth (m.)	Number of reading	%Ro			Data source
			Min	Ave	Max	
Nosrat	۲۸۸۴	۸	۰/۴۳	۰/۴۹	۰/۵۵	New data
Nosrat	۲۹۰۸/۵	۶	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۵۵	New data
Nosrat	۲۹۲۷	۱۴	۰/۴۱	۰/۵۱	۰/۶۱	New data
Nosrat	۲۹۴۲	۱۲	۰/۴۲	۰/۴۹	۰/۶۰	New data
Nosrat	۲۹۶۵	۹	۰/۴۰	۰/۵۱	۰/۶۰	New data
Farzam	۲۲۱۵	۱۵	۰/۴۰	۰/۵۰	۰/۶۰	New data
Farzam	۲۲۲۹	۱۴	۰/۴۱	۰/۵۱	۰/۶۱	New data
Sirri	۲۳۳۵	۱۹	۰/۴۲	۰/۵۳	۰/۶۵	New data
Sirri	۲۳۴۸	۱۴	۰/۴۶	۰/۵۵	۰/۶۸	New data
Kharg	۲۵۷۸	۱۳	۰/۳۸	۰/۴۵	۰/۶۲	New data
Kharg	۲۵۷۴	۱۴	۰/۳۸	۰/۴۸	۰/۶۳	New data
Kharg	۲۵۶۶	۱۵	۰/۳۶	۰/۴۷	۰/۶۰	New data
Kharg	۲۵۵۸	۱۴	۰/۳۵	۰/۴۷	۰/۵۸	New data
Foroozan	۱۷۳۸/۵	-	-	۰/۴۶	-	Old data

نتایج

منحنی تغییرات S1 در برابر درصد وزنی TOC برای تعیین این آلودگی استفاده می‌شود (Behar et al., 1996; Hunt, 2001). برای این کار، نمونه‌هایی که مقادیر S1/TOC بیشتر از ۱/۵ (هیدروکربن‌های نابرجا^۱ یا مهاجرت یافته و آلوده) و شاخص تولید بالاتر از ۰/۵ را دارا باشند، از ادامه مطالعه حذف می‌کنیم (Hosseiny and Hunt, 1996; Barati Boldaji, 2020). در مطالعه حاضر، کلیه ۴۳ نمونه حوضه خلیج فارس عاری از هر گونه آلودگی است (شکل ۳) و برای ادامه بررسی پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند گورپی قابل اعتماد و استفاده می‌باشد.

تعیین کمیت و پتانسیل تولید هیدروکربن ماده آلی سازند گورپی

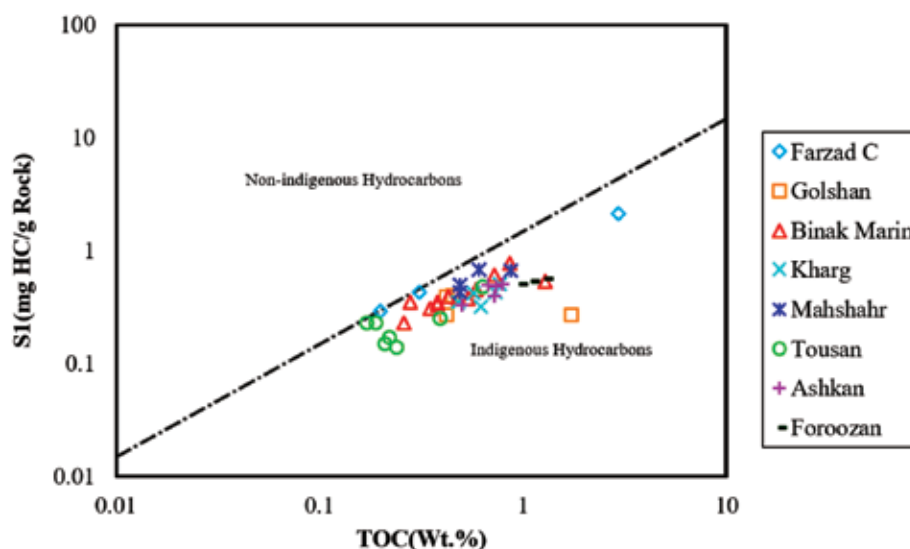
برای بررسی پتانسیل هیدروکربن‌زایی یک سازند و تعیین کمیت ماده آلی آن از مقدار کربن آلی کل یا TOC استفاده می‌کنیم (Hosseiny and Mohseni, 2023). هنگامی که نمونه‌های ما مقادیر TOC کمتر از ۰/۵ درصد وزنی داشته باشند در بازه ضعیف قرار می‌گیرند. همچنین اگر مقادیر TOC در بازه‌های ۰/۵-۱، ۱-۲ و بالاتر از ۲ درصد وزنی

برای مطالعات بیشتر پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند گورپی در گستره حوضه خلیج فارس از میدان‌های مورد مطالعه نمونه‌برداری انجام گرفت و آنالیزهای مورد نیاز این مطالعه توسط دستگاه پیرولیز راک‌ایول صورت پذیرفت. در ادامه بررسی‌ها با توجه به پارامترهای اندازه‌گیری شده از این آنالیزها برای تعیین کمیت، کیفیت و بلوغ مواد آلی، نمودارهای استاندارد مربوطه رسم شد و تفاسیر مربوطه در ادامه مطالعه آورده شده است.

آلودگی نمونه‌ها (شاخص مهاجرت)

بررسی مقدار آلوده بودن نمونه‌های مورد مطالعه و اطمینان از عدم آلودگی این نمونه‌ها جزو ابتدایی‌ترین اقدامات در بررسی و مطالعات ژئوشیمیایی می‌باشد. چرا که آلوده بودن نمونه‌های مورد مطالعه اثر مستقیمی بر روی نتایج حاصل از پیرولیز راک‌ایول می‌گذارد. بنابراین در ابتدا باید از عدم آلوده بودن نمونه‌ها اطمینان کامل پیدا کنیم. آلودگی نمونه‌ها می‌تواند از مهاجرت هیدروکربن از لایه‌ها و سازندهای پایینی بوده (Behar et al., 1996; Hunt, 2001) و یا بر اثر نفوذ مواد هیدروکربنی که در گل حفاری موجود هست، باشد (Smith, 1994). بنابراین از بررسی

1. Non-indigenous Hydrocarbon



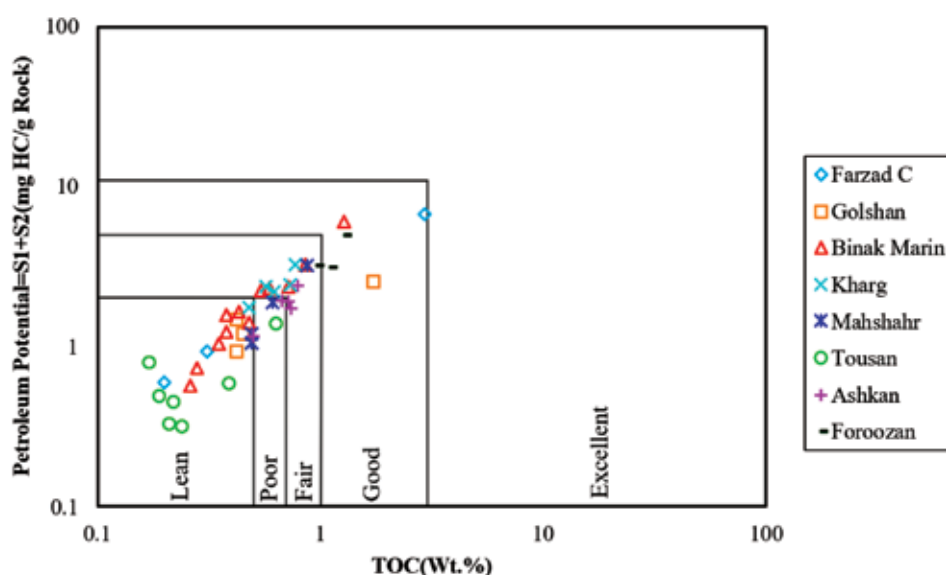
شکل ۳. نمودار شاخص مهاجرت برای تعیین نمونه‌های آلوده سازند گورپی در میداین مورد مطالعه حوضه خلیج فارس (Hunt, 1996)

باشند، بیانگر محدوده‌های متوسط، خوب و عالی کمیت آن سازند می‌باشند (Peters, 1986). علاوه بر TOC، از مقادیر S1 و S2 به همراه TOC برای ارزیابی سازند و تعیین کمیت آن استفاده می‌شود، چرا که استفاده از TOC به تنهایی برای بررسی پتانسیل هیدروکربن‌زایی یک سازند کافی نیست (Huang et al., 2003). از موارد دیگری که برای ارزیابی کمیت مواد آلی سازندها استفاده می‌شود، می‌توان به نمودار تغییرات TOC در برابر اندیس پتانسیل هیدروکربن‌زایی اشاره کرد (Tissot and Welte, 1984). هنگامی که اندیس پتانسیل هیدروکربن‌زایی مقداری کمتر از ۶ داشته باشد، توان ضعیف و متوسط سازند مورد نظر را نشان می‌دهد. در حالی که مقادیر بالاتر از ۶ این اندیس، نشان‌دهنده حضور یک سازند با کیفیتی در گستره خوب و عالی می‌باشد (Hosseiny and Barati Boldaji, 2020). با توجه به جدول شماره ۱، میزان کربن آلی کل در سازند گورپی، به صورت کلی در گستره حوضه خلیج فارس در بازه ۰/۱۷ تا ۲/۹۴ درصد وزنی متغیر می‌باشد. در میدان فرزاد C، این مقدار بین ۰/۲۰ تا ۲/۹۴ درصد وزنی در بازه کمیتی ضعیف تا عالی و مقدار میانگین TOC سازند گورپی در این میدان برابر ۱/۱۵ درصد وزنی است که نشان‌دهنده بازه خوب برای کمیت آن می‌باشد. برای میدان گلشن، این مقادیر بین ۰/۴۲ تا ۱/۷۳ درصد وزنی (گستره ضعیف تا خوب کمیت) و مقدار

میانگین TOC ۰/۷۶ درصد وزنی، گستره متوسط کمیت را برای سازند گورپی بیان می‌کند. از دیگر میداین مورد مطالعه می‌توان به میدان بینک دریایی اشاره کرد. مقادیر TOC در این میدان در بازه ۰/۲۶ تا ۱/۲۸ درصد وزنی و نشان‌دهنده گستره ضعیف تا خوب سازند گورپی در این میدان است. همچنین مقدار میانگین TOC این سازند در میدان بیان شده ۰/۵۵ درصد وزنی و نشان‌دهنده کمیت متوسط سازند گورپی می‌باشد. مقدار TOC برای میدان خارگ در گستره ۰/۴۸ تا ۰/۷۷ درصد وزنی است که بازه کمیتی ضعیف تا متوسط را برای سازند گورپی شامل می‌شود. این میدان با مقدار میانگین ۰/۶۳ درصد وزنی TOC، کمیتی در محدوده متوسط را نشان می‌دهد. مقادیر TOC در میدان ماهشهر هم در بازه ۰/۸۷-۰/۴۹ درصد وزنی می‌باشد که کمیت سازند گورپی در این میدان در گستره ضعیف تا متوسط قرار داشته و مقدار میانگین TOC برای این میدان ۰/۶۲ درصد وزنی و بیانگر کمیت متوسط سازند کژدمی این میدان می‌باشد. بازه TOC میدان‌های توسن و اشکان به ترتیب ۰/۶۳-۰/۱۷ درصد وزنی (کمیتی در محدوده ضعیف تا متوسط) و ۰/۷۹-۰/۵۰ درصد وزنی (کمیتی در محدوده متوسط) می‌باشد که مقادیر میانگین TOC برای این میداین نیز به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۶۸ درصد وزنی است که نشان می‌دهد که سازند گورپی در میدان توسن در محدوده ضعیف و میدان اشکان در گستره متوسط

تمام ضخامت سازند گورپی در این حوضه و میادین باشد که این موضوع نیازمند دقت بیشتری می‌باشد. همچنین مقادیر میانگین اندیس پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند گورپی در میادین فرزاد C، گلشن، بینک دریایی، خارگ، ماهشهر، توسن، اشکان و فروزان به ترتیب برابر با ۲/۷۵، ۱/۵۵، ۲/۰۴، ۲/۴۰، ۱/۸۴، ۰/۶۳، ۱/۸۳ و ۳/۲۳ می‌باشد. این مقادیر میانگین نشان می‌دهد، سازند گورپی در حوضه خلیج فارس از توان هیدروکربن‌زایی ضعیف تا متوسطی برخوردار است (شکل ۴).

از جنبه‌ی کمیتی قرار دارند. آخرین میدان مورد مطالعه هم میدان فروزان است که مقادیر TOC سازند گورپی در این میدان برابر با ۱/۲۹-۰/۹۷ درصد وزنی است و در گستره متوسط تا خوب کمیت قرار دارد. مقدار TOC میانگین در این میدان برابر ۱/۱۲ درصد وزنی است که محدوده کمیتی خوب را شامل می‌شود. در برخی از میادین مورد مطالعه حوضه خلیج فارس در مطالعه حاضر، تعداد سه و یا چهار نمونه مورد ارزیابی قرار گرفته است که این تعداد نمونه نمی‌تواند نماینده و معرف



شکل ۴. نمودار تغییرات TOC در مقابل اندیس پتانسیل هیدروکربن‌زایی سازند گورپی در میادین مورد مطالعه حوضه خلیج فارس (Tissot and Welte, 1984)

تعیین کیفیت و تیپ کروژن سازند گورپی

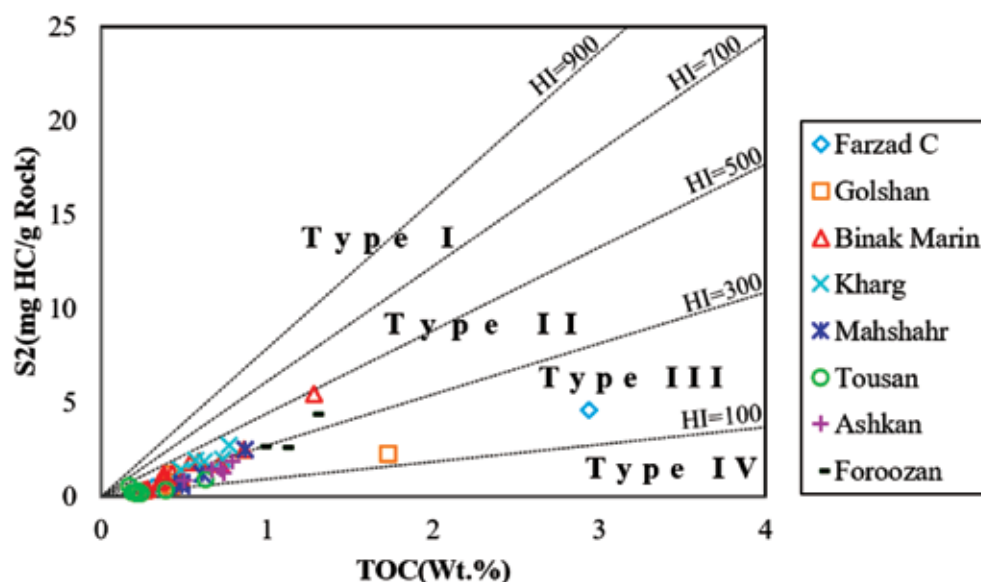
می‌باشد که در سنگ‌هایی از جنس رسوبی شکل می‌گیرند (Batten, 1996; Barati Boldaji et al., 2024). از نمودار تغییرات اندیس هیدروژن در برابر اندیس اکسیژن (نمودار ون کروئل تصحیح شده) برای شناسایی و تعیین تیپ کروژن استفاده می‌شود. همچنین برای دقت بیشتر و تایید نتایج بدست آمده از نمودار تغییرات اندیس هیدروژن در برابر T_{max} نیز می‌توان استفاده کرد (Peters, 1986; Hunt, 1996). از نمودارهای دیگری که تیپ کروژن حاضر در سنگ منشا و کیفیت سازند مورد نظر را تعیین می‌کند، می‌توان به نمودار تغییرات TOC در برابر S2 اشاره کرد (Peters, 1986) که شیب این نمودار برابر با اندیس هیدروژن می‌باشد

از آنجایی که کمیت و کیفیت هیدروکربن‌زایی یک سازند با نوع ماده آلی موجود در آن بررسی و کنترل می‌شود، بنابراین تعیین تیپ کروژن موجود در سنگ منشا بالقوه امری بسیار مهم به حساب می‌آید (Tissot and Welte, 1984; Hosseiny et al., 2016). تیپ کروژن نقش مهمی در تعیین نفت‌زا و یا گاززا بودن سنگ منشا دارد (Tissot and Welte, 1984). از پارامترهای حاصل از آنالیز راکایول برای تعیین آن استفاده می‌شود (Dembicki, 2022). کروژن یک ماده آلی انحلال ناپذیر در حلال‌های آلی می‌باشد و از انواع ماسرال‌های متنوعی تشکیل شده است. کروژن، از اجزای گیاهان، جانوران و باکتری‌ها

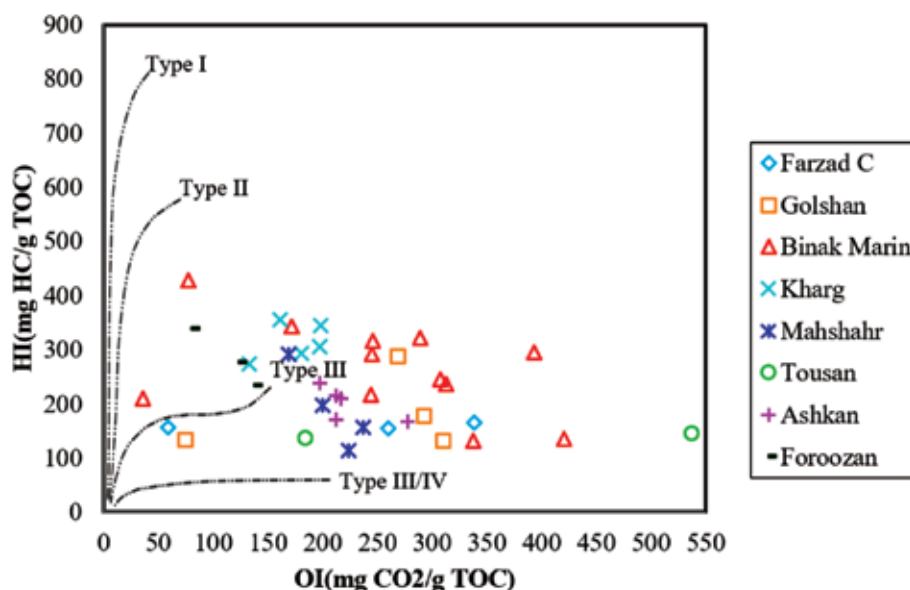
دریایی گستره اندیس هیدروژن بین ۱۳۱ تا ۴۲۸ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) است که تیپ کروژن سازند گوری تلفیقی از تیپ II و III در این میدان است. در میدان خارگ اندیس هیدروژن مقداری بین ۲۷۳-۳۵۶ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) را دارد که سازند گوری این میدان دارای کروژن تیپ II می باشد. مقادیر اندیس هیدروژن ۱۱۴-۱۹۱ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) در میدان ماهشهر بیان می کند که تیپ کروژن ما در این میدان، کروژن تیپ II و III برای سازند گوری است. در میدان توسن اندیس هیدروژن از ۷۵ تا ۳۳۵ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) می باشد که کروژن موجود در این میدان، بیشتر از تیپ III است. مقادیر اندیس هیدروژن در میدان اشکان هم در بازه ۱۶۸-۲۳۹ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) می باشد که نشان دهنده تیپ III کروژن برای سازند گوری این میدان است. در نهایت در میدان فروزان هم بازه اندیس هیدروژن از ۲۳۵ تا ۳۴۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) است و نشان می دهد میدان فروزان دارای تلفیق تیپ II و III کروژن در سازند گوری می باشد (شکل ۵). همچنین نمودار اندیس هیدروژن در مقابل اندیس اکسیژن هم برای تایید نتایج بالا در ادامه آورده شده است (شکل ۶).

(Espitalié, 1986). مقادیر اندیس هیدروژن بیشتر از ۶۰۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) بیانگر تیپ I کروژن و مقادیر بین ۳۵۰ تا ۶۰۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) نشان دهنده تیپ II کروژن می باشد. همچنین کروژن تیپ III مقدار اندیس هیدروژن بین ۵۰ تا ۲۰۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) را دارد (Langford and Blanc-Valleron, 1990; Peters and Cassa, 1994; Hunt, 1996). هنگامی که مقادیر اندیس هیدروژن کمتر از ۵۰ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) باشند، معرف کروژن تیپ IV می باشد و هیچ پتانسیلی برای تولید هیدروکربن در آن ها دیده نمی شود (Tissot and Welte, 1984). برای رسم نمودارهای تعیین کیفیت سازند، باید دقت کرد، پارامترهای موجود علاوه بر نوع مواد آلی، در اثر بلوغ و همچنین عوامل ثانویه تاثیر گذار بر روی مواد آلی نیز قرار ندارد (Peters and Cassa, 1994).

مقادیر اندیس هیدروژن در میدان فرزاد C بین ۱۵۵ تا ۱۶۵ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) می باشد و بیانگر تیپ III کروژن برای سازند گوری در این میدان است. همچنین این مقدار در میدان گلشن از ۱۳۱ تا ۲۸۸ (میلی گرم هیدروکربن/گرم TOC) می باشد که تیپ کروژن سازند گوری را تیپ III معرفی می کند. در میدان بینک



شکل ۵. نمودار تغییرات S2 در برابر TOC برای تعیین نوع کروژن موجود در سازند گوری در میادین مورد مطالعه حوضه خلیج فارس (Langford and Blanc-Valleron, 1990)



شکل ۶. نمودار اندیس هیدروژن در برابر اندیس اکسیژن برای سازند گورپی در میدین مورد مطالعه حوضه خلیج فارس (Hunt, 1996)

بلوغ مواد آلی سازند گورپی

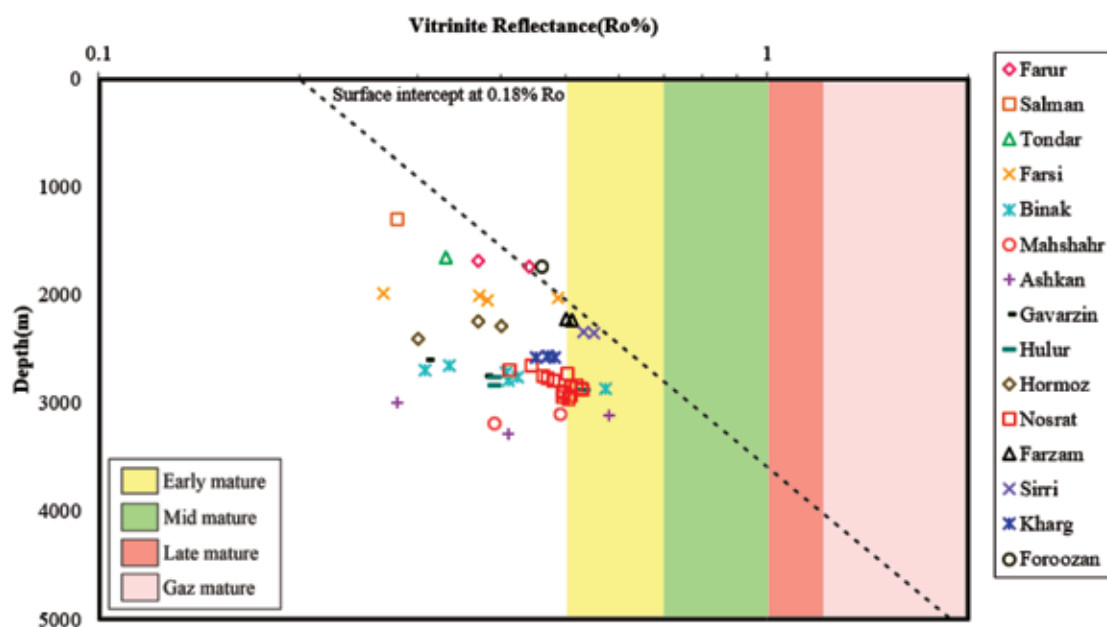
در نمونه‌ها را بررسی و تعیین کرد (Tissot and Welte, 1984; Espitalié et al., 1985).

تغییرات انعکاس ویتربایت در برابر عمق در شکل ۷ رسم شده است. با توجه به شکل، مقادیر انعکاس ویتربایت نمونه‌های میدین فارور، سلمان، تندر، فارسی، ماهشهر، گورزین، هرمز، خارگ و فروزان کمتر از ۰/۵ درصد است و این نمونه‌ها نابالغ هستند. اما تعدادی از نمونه‌های میدین بینک، اشکان، هُلر، نصرت، فرزام و سیری مقادیری کمی بالاتر از ۰/۵ درصد را داشته و نشان می‌دهد نمونه‌های این میدین یا نابالغ است و یا در ابتدای بلوغ حرارتی قرار دارند. نمودار اندیس هیدروژن در برابر T_{max} رسم شده (شکل ۸) برای نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد، نمونه‌های سازند گورپی واقع در حوضه خلیج فارس نابالغ و یا در ابتدای بلوغ حرارتی قرار دارند و نتایج نمودار ۷ را نیز تایید می‌کنند.

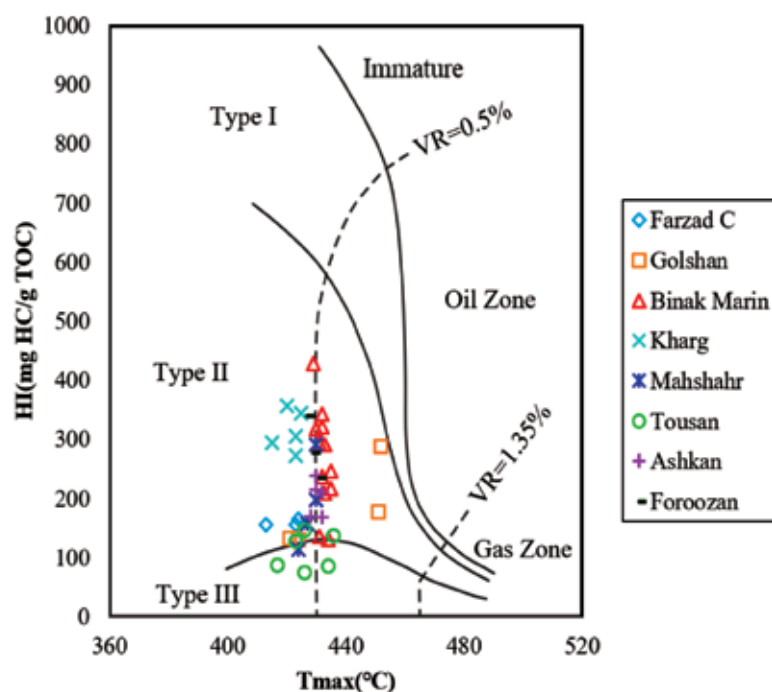
بحث

گسترش توزیع مقدار کل کربن آلی برای سازند گورپی در محدوده خلیج فارس نشان می‌دهد که این مقدار در اثر فرآیندهای تکتونیکی قدیمه از قبیل بلندای قدیمه قطر-فارس قرار داشته است. مقدار کل کربن آلی با حرکت از

از مهم‌ترین کارهایی که در ارزیابی سنگ‌های منشا باید انجام شود، می‌توان به تعیین بلوغ حرارتی مواد آلی اشاره کرد (Dow, 1977; Waples et al., 1992). چراکه تولید نفت و گاز، به تکامل بلوغ حرارتی مواد آلی موجود در سازند وابسته است (Hosseiny et al., 2016). بنابراین از روش انعکاس ویتربایت برای بررسی و تعیین اندازه بلوغ سنگ منشا استفاده می‌شود (Dow, 1977; Waples et al., 1992). همچنین به کمک پارامترهای اندیس تولید و T_{max} نیز می‌توان اندازه بلوغ مواد آلی را تعیین کرد. به صورتی که اگر مقدار اندیس تولید ۰/۱ و پارامتر T_{max} مقادیری کمتر از ۴۳۵ درجه سانتی‌گراد را داشته باشند، بیانگر نابالغ بودن کروژن و همچنین اگر اندیس تولید بیشتر از ۰/۴ و T_{max} بالاتر از ۴۶۰ درجه سانتی‌گراد باشد معرف پایان پنجره نفتی و ابتدای محدوده گاز تر می‌باشد (Espitalié et al., 1977). پارامترهای T_{max} و اندیس تولید می‌توانند در اثر نوع ماده آلی، نوع کانی و آلوده شدن نمونه‌ها قرار گیرند، بنابراین در استفاده از این پارامترها باید دقت داشته باشیم (Hosseiny and Barati Boldaji, 2020). با مطالعه نمودار T_{max} در برابر اندیس هیدروژن نیز، می‌توان بلوغ حرارتی نمونه‌ها را بررسی و همچنین تیپ کروژن موجود



شکل ۷. نمودار میانگین انعکاس ویتترینایت اندازه‌گیری شده در برابر عمق برای نمونه‌های سازند گورپی در میادین مورد مطالعه حوضه خلیج فارس



شکل ۸. نمودار اندیس هیدروژن در برابر T_{max} برای تعیین تیپ کروژن و بلوغ نمونه‌های سازند گورپی در میادین مورد مطالعه حوضه خلیج فارس (Espitalié et al., 1985)

می‌دهد مقدار کل کربن آلی در انطباق با ضخامت سازند بیان شده قرار دارد. به نظر می‌رسد این افزایش به دلیل عمق بیشتر حوضه رسوبگذاری سازند گورپی در شرق و تاثیر بیشتر ورود مواد مغزی در غرب خلیج فارس همراه با افزایش سرعت رسوبگذاری و در نتیجه آن حفظ شدگی بهتر مواد آلی در

بلندای قدیمه قطر-فارس به سمت شمال غرب (در راستای میادین فرزاد C و فروزان تا میانگین ۱/۲ درصد وزنی) و به سمت شرق و عمان افزایش یافته است (شکل ۹). مقایسه افزایش در مقدار کل کربن آلی با نقشه هم ضخامت رسوبی سازند گورپی در محدوده خلیج فارس (شکل ۱۰) نشان

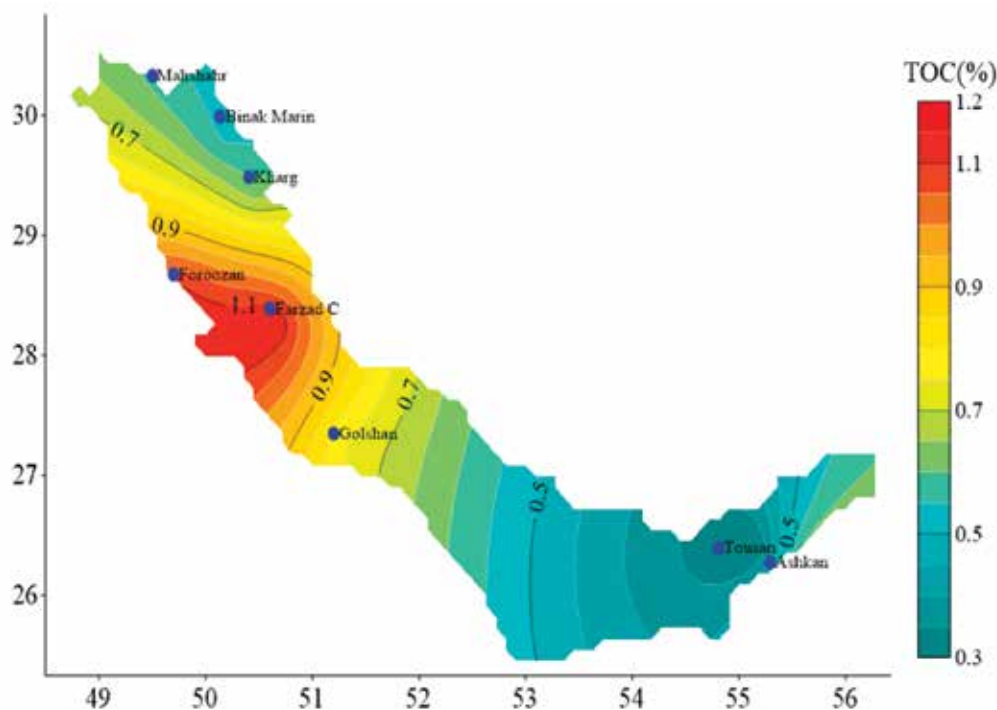
نسبت به کروژن نوع III دارد. ضخامت بالای سازند گورپی در محل میادین فروزان، خارگ، بینک تا ماهشهر نشان از عمق بیشتر دریای قدیمه گورپی و تاثیر پذیری بیشتر ورودی آواری از رسوبات قاره‌ای است. این نتایج در انطباق با نتایج حاصل از مقدار کل کربن آلی (شکل ۹) و ضخامت سازند گورپی (شکل ۱۰) می‌باشد.

گسترش توزیع میانگین انعکاس ویترونیات برای سازند گورپی در محدوده خلیج فارس (شکل ۱۲) نشان می‌دهد که بلوغ سازند گورپی به شدت در اثر بلندای قدیمه قطر-فارس قرار داشته است. کمترین مقدار بلوغ سازند کژدمی در محدوده بالاآمدگی قطر-فارس با میانگین ۰/۳ می‌باشد. با حرکت از بلندای قدیمه بیان شده به سمت شمال غرب و شرق خلیج فارس مقدار بلوغ افزایش یافته و در شمال غرب در گستره میادین فروزان، خارگ تا ماهشهر به میانگین ۰/۵ درصد رسیده است که نشان می‌دهد سازند گورپی در ابتدای ورود به پنجره نفت‌زایی قرار دارد. همچنین به سمت شرق خلیج فارس مقدار انعکاس ویترونیات افزایش یافته است (شکل ۱۲).

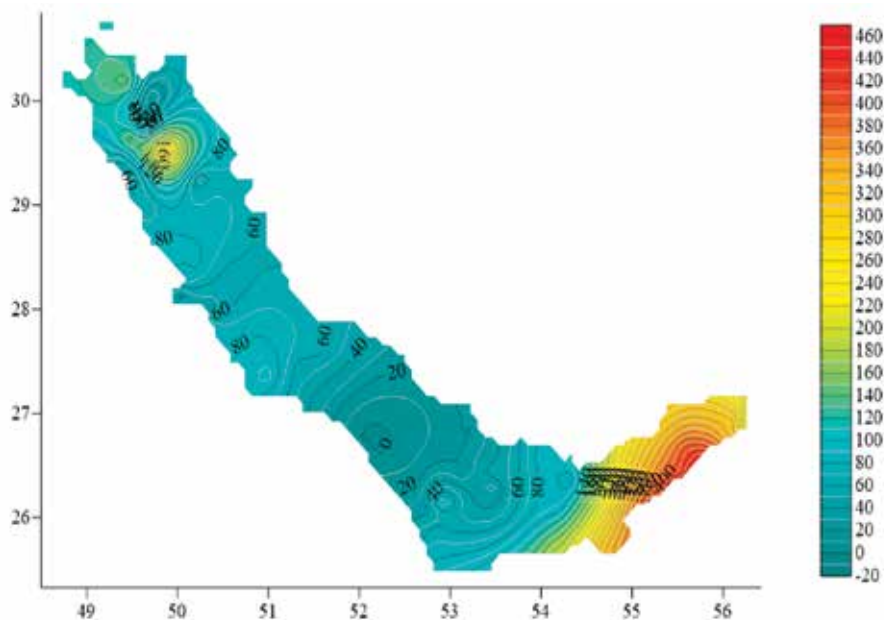
نتیجه نبود زمان کافی برای تجزیه تفسیر گردد. از طرف دیگر افزایش در مقدار اندیس هیدروژن (شکل ۱۱) نشان می‌دهد که شرایط نیمه اکسیدان تا فاقد اکسیژن برای حفظ شدگی مواد آلی در رسوبات سازند گورپی به سمت شمال غرب خلیج فارس افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد، در بخش شمال غربی خلیج فارس که به ورودی آواری نزدیکتر می‌باشد، شرایط محلی برای حفظ مواد آلی تشکیل شده به‌صورت محیط‌های جلودلتایی تا دریایی در بخش غربی ایجاد شده است (Konyuhov and Maleki, 2006).

این افزایش در مقدار کل کربن آلی و اندیس هیدروژن در بخش غربی با نتایج ارائه شده قبلی که تغییر را به دلیل نزدیکی به سپر عربی و تاثیر سیستم‌های رودخانه‌ای و ورود مقادیر قابل توجهی از رسوبات آواری از قبیل سیلت سنگ‌ها که منعکس کننده یک محیط رسوبی دلتایی یا رودخانه‌ای است (Konyuhov and Maleki, 2006) تفسیر کرده‌اند همخوانی و انطباق دارد.

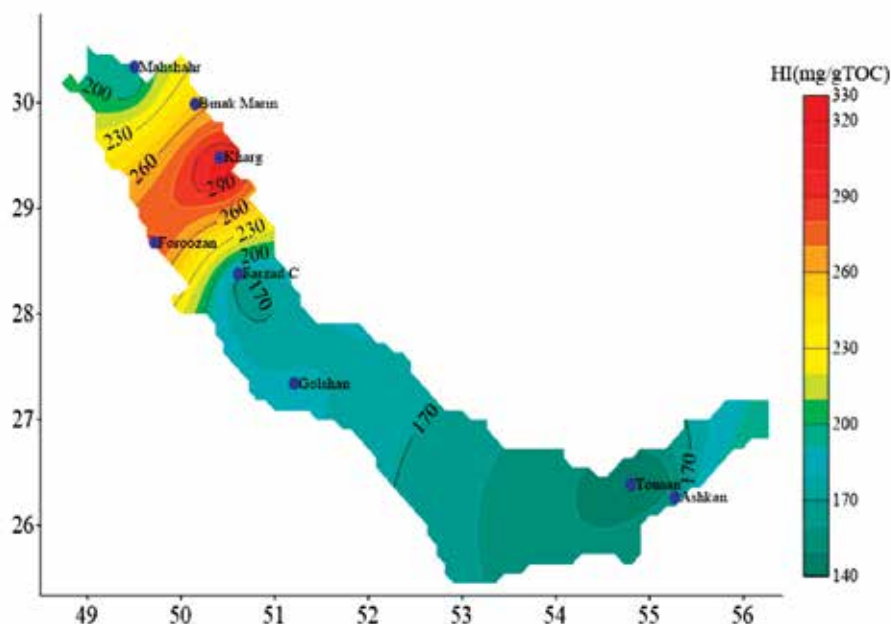
مقدار اندیس هیدروژن در میادین شمال غربی خلیج فارس به میانگین ۲۹۰ میلی گرم هیدروکربن بر گرم سنگ رسیده است و نشان‌دهنده مشارکت بیشتر کروژن نوع II



شکل ۹. مدل هم‌ضخامت مقدار TOC سازند گورپی در خلیج فارس



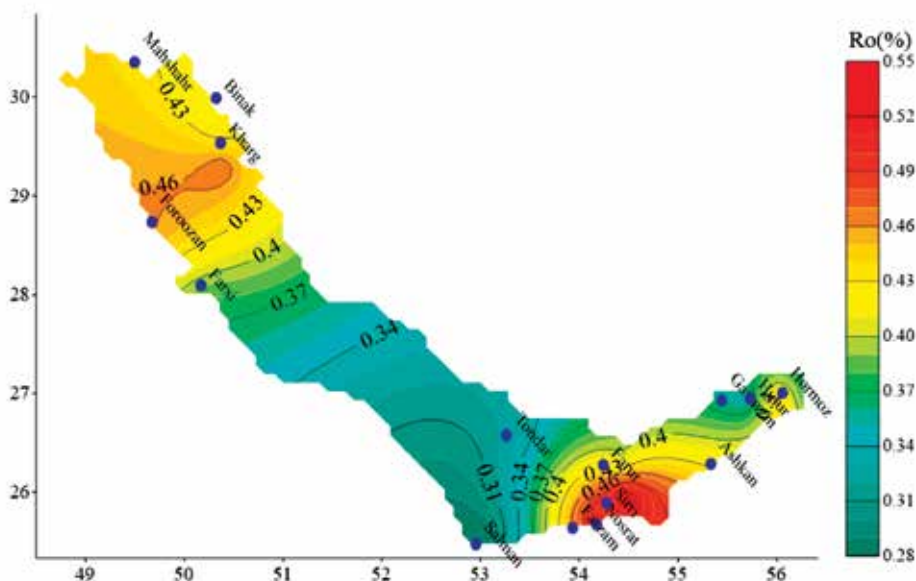
شکل ۱۰. مدل هم‌ضخامت سازند گورپی در خلیج فارس



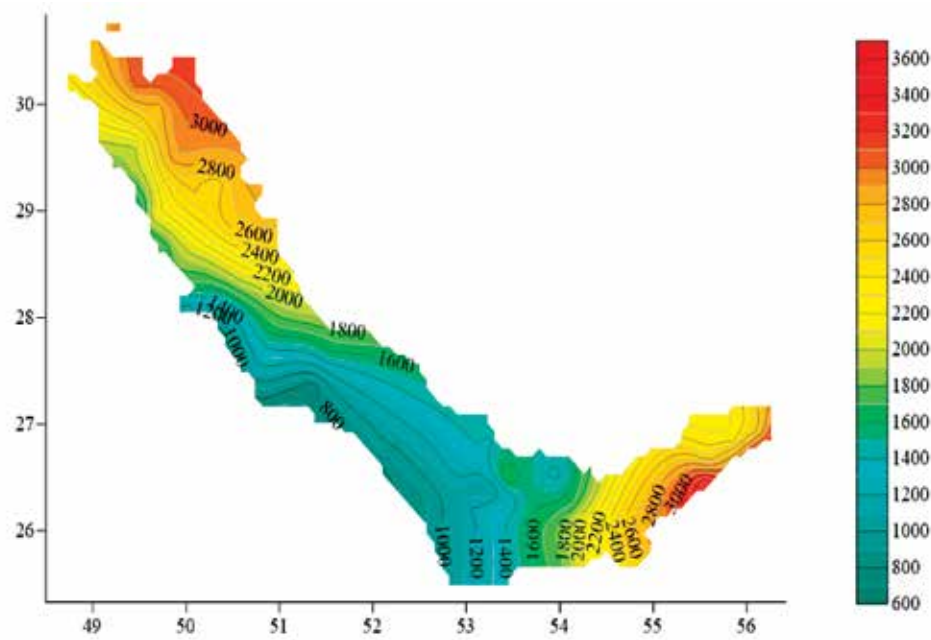
شکل ۱۱. مدل هم‌ضخامت مقدار HI سازند گورپی در خلیج فارس

غرب و شرق خلیج فارس این مقدار به ۳۰۰۰ متر رسیده است. این نتایج نشان می‌دهد، سازند گورپی در شمال غرب و شرق خلیج فارس در محدوده عمقی دو برابری نسبت به مقدار انعکاس و پترینایت (در محل تاقدیس‌های نمونه‌برداری شده) نشان می‌دهد، سازند بیان شده در بیشترین حالت خود در ابتدای پنجره نفتی قرار دارد و در محل‌های تاقدیسی

ضخامت رسوبات بالای سازند گورپی را می‌توان به‌عنوان عاملی برای تفسیر عمق تدفین سازند گورپی در محدوده خلیج فارس مورد استفاده قرار داد (شکل ۱۳). ضخامت رسوبات بالای سازند گورپی نشان می‌دهد، در محدوده مرکزی خلیج فارس و در محل بلندای قدیمه قطر-فارس کمترین ضخامت لایه‌های رسوبی وجود داشته است (۹۰۰ تا ۱۵۰۰ متر). با این وجود با حرکت به سمت شمال



شکل ۱۲. مدل هم ضخامت مقدار انعکاس و پترینایت سازند گورپی در خلیج فارس



شکل ۱۳. مدل هم ضخامت تدفین رسوبات بالای سازند گوری در خلیج فارس

نتیجہ گیری

توان هیدروکربن‌زایی سازند گورپی به‌عنوان سنگ منشأ احتمالی در حوضه خلیج فارس بر اساس نتایج حاصل از پیرولیز راک‌ایول همراه با نتایج آنالیز انعکاس ویتروینایت مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفت. نتایج پیرولیز راک‌ایول نشان داد، سازند مذکور در بخش‌های مختلف خلیج فارس از توزیع کمی و کیفی و نوع کروژن متفاوتی تشکیل شده است.

نقش عمده‌ای در تولید هیدروکربن مخازن خلیج فارس بازی نکرده است. با این وجود به نظر می‌رسد سازند گورپی در محدوده ناودیس‌ها وارد پنجره نفتی شده باشد و مشارکت هر چند حداقلی در تولید هیدروکربن بخصوص در شمال غرب خلیج فارس داشته است.

علمی علوم زمین، ۲۱(۸۲)، ۳۱-۳۸. Doi: 10.22071/gsj.2011.54436

- براتی بلداجی، ص.، سفیداری، ا.، مهرابی، ه. و زمان زاده، س.م.، ۱۴۰۳. ارزیابی ژئوشیمیایی سنگ مادرهای احتمالی میدان فروزان بر اساس پیرولیز راکا اول و انعکاس ویتربایت. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۴(۲)، ۷۴-۵۹. Doi: https://10.22071/gsj.2023.422750.2119

- حسینی، ا. و براتی بلداجی، ص.، ۱۳۹۹. ارزیابی توان هیدروکربن زایی سنگ مادر سرگلو در گستره جنوب غرب ایران و شمال غرب خلیج فارس. روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۱۰(۲۳)، ۷۹-۸۹. Doi: http://ps://doi: 10.29252/anm.2020.14351.1451

- ربانی، ا.ر.، ۱۳۹۲. زمین شناسی و ژئوشیمی نفت خلیج فارس. تفرش، دانشگاه تفرش، ۵۸۲.

- سفیداری، ا.، ۱۴۰۲. ژئوشیمی مخزن. جهاد دانشگاهی واحد شهید بهشتی، ۲۸۷.

- کمالی، م. و قربانی، ب.، ۱۳۸۵. ژئوشیمی آلی از فیتوپلانکتون تا تولید نفت، آربن زمین، تهران، ۳۱۸.

- Alavi, M., 2004. Regional Stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust Belt of Iran and Its Pro-foreland Evolution. American Journal of Science, 304(1): 1-20. Doi: http://dx.doi.org/10.2475/ajs.304.1.1.

- Alipour, M., Alizadeh, B., Mirzaie, S. and Chehrazai, A., 2021. Basin and petroleum system analysis in the southeastern Persian Gulf basin: a 2D basin modeling approach. J Petrol Explor Prod Technol 11, 4201-4214 (2021). Doi: https://doi.org/10.1007/s13202-021-01310-2.

- Barker, C., 1974. Pyrolysis techniques for source-rock evaluation. AAPG Bulletin, 58(11): 2349-2361. Doi: https://doi.org/10.1306/83D91BAF-16C7-11D7-8645000102C1865D.

- Batten, D.J., 1996. Palynofacies and Palaeoenvironmental Interpretation. In: Jansonius, J. and McGregor, D.C., Eds. Palynology: Principles and Applications, 3, American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, College Station, 1011-1064.

بر اساس گسترش توزیع مقدار کل کربن آلی برای سازند بیان شده در محدوده خلیج فارس می توان نتیجه گیری کرد که کمیت مواد آلی در اثر فرآیندهای تکتونیکی قدیمه از قبیل بلندای قدیمه قطر-فارس قرار داشته است. با حرکت از بلندای قدیمه قطر-فارس به سمت شمال غرب در راستای میادین فرزاد C و فروزان این مقدار افزایش داشته است. همچنین به سمت شرق و عمان نیز بر مقادیر آن افزوده شده است.

گسترش نقشه مقدار اندیس هیدروژن برای سازند گورپی در محدوده خلیج فارس نشان داد که شرایط نیمه اکسیدان تا فاقد اکسیژن برای حفظ شدگی مواد آلی در رسوبات سازند گورپی به سمت شمال غرب خلیج فارس افزایش یافته است. این نتایج نشان می دهد، در بخش شمال غربی خلیج فارس که به ورودی آواری نزدیک تر هستند، شرایط محلی برای حفظ مواد آلی تشکیل شده به صورت محیط های جلودلتایی تا دریایی در بخش غربی ایجاد شده است.

توزیع میانگین انعکاس ویتربایت برای سازند گورپی در محدوده خلیج فارس نشان داد، کمترین مقدار بلوغ سازند مذکور در محدوده بالآمذگی قطر-فارس می باشد. با حرکت از بلندای قدیمه مذکور به سمت شمال غرب و شرق خلیج فارس مقدار بلوغ افزایش یافته و در شمال غرب به بیشترین مقدار خود رسیده است و نشان می دهد سازند گورپی در ابتدای ورود به پنجره نفت زایی قرار دارد.

نتایج این مطالعه نشان داد که سازند مذکور در بیشترین حالت خود در ابتدای پنجره نفتی قرار دارد و در محل های تاقدیسی نقش عمده ای در تولید هیدروکربن مخازن خلیج فارس بازی نکرده است. نقش این سازند در محدوده ناودیس ها و مشارکت هر چند حداقلی در تولید هیدروکربن به خصوص در شمال غرب خلیج فارس نیاز به مطالعه بیشتر دارد.

منابع

- اسدی مهماندوستی، ا.، علیزاده، ب. و آدابی، م.ح.، ۱۳۹۰. ارزیابی ژئوشیمیایی سنگ های منشأ و نفت های خام میدان نفتی مارون با استفاده از دستگاه پیرولیز راکا یول ۶ و کروماتوگرافی گازی (GC). فصلنامه

- Behar, F., Beaumont, V.D.E.B. and Pentead, H.D.B., 2001. Rock-Eval 6 technology: performances and developments. *Oil & Gas Science and Technology*, 56(2): 111-134. Doi: <https://doi.org/10.2516/ogst:2001013>.
- Berberian, M. and Kings, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2), 210-265. Doi: <https://doi.org/10.1139/e81-019>.
- Bordenave, M.L. 1993. Applied petroleum geochemistry. Editions Technip, Paris.
- Bordenave, M.L. and Hegre, J.A., 2010. Current distribution of oil and gas fields in the Zagros Fold Belt of Iran and contiguous offshore as the result of the petroleum systems. London, Geological Society, 330 (Special Publications), 291-353. Doi: <https://doi.org/10.1144/SP330.14>.
- Darvishzadeh, A., 2009. Geology of Iran. Amirkabir publication company, 434.
- Dembicki, H., 2022. Practical petroleum geochemistry for exploration and production. Elsevier.
- Dow, W.G., 1977. Kerogen studies and geological interpretations. *Journal of geochemical exploration*, 7: 79-99. Doi: [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(77\)90078-4](https://doi.org/10.1016/0375-6742(77)90078-4).
- England, W.A., 2007. Reservoir geochemistry-A reservoir engineering perspective. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 58(3-4): 344-354. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.12.012>.
- Espitalié, J., 1986. Use of Tmax as a Maturation Index for Different Types of Organic Matter. Comparison with Vitrinite Reflectance. In: *Thermal Modeling in Sedimentary Basins*. ed. By Burrus, J. Publications de l'Institut Français du Pétrole / Institut Français du Pétrole, 44. Editions Technip, Paris, 475-496. Doi: <https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/40227>.
- Espitalié, J., Deroo, G. and Marquis, F., 1985. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. Deuxième partie. *Revue de l'Institut français du Pétrole*, 40(6): 755-784. Doi: <https://doi.org/10.2516/ogst:1985045>.
- Espitalié, J., Laporte, J.L., Madec, M., Marquis, F., Leplat, P. and Paulet, J., 1977. Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution, *Review Institut Français du Pétrole*, 32(1): 23-42. Doi: <https://doi.org/10.2516/ogst:1977002>.
- Espitalie, J., Marquis, F. and Barsony, v., 1984. Geochemical logging. In: K. J. Voorhees (Eds), *Analytical Pyrolysis: Techniques and applications*, Butterworths, Boston, 276-304. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-01417-5.50013-5>.
- Ghazban, F., 2007. Petroleum Geology of the Persian Gulf. Tehran University and National Iranian Oil Company Publications, Tehran, 707.
- Han, H., Zhong, N.N., Huang, C.X. and Zhang, W., 2015. Pyrolysis kinetics of oil shale from northeast China: Implications from thermogravimetric and Rock-Eval experiments. *Fuel*, 159, 776-783. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.07.052>.
- Hosseiny, E. and Mohseni, A., 2023. Garau Formation as an unconventional hydrocarbon resource in southwestern Iran: a geochemical investigation. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 13(7): 1535-1549. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01634-1>.
- Hosseiny, E., Rabbani, A.R. and Moallemi, S.A., 2016. Source rock characterization of the Cretaceous Sarvak Formation in the eastern part of the Iranian sector of Persian Gulf. *Organic geochemistry*, 99: 53-66. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2016.06.005>.
- Huang, B., Xiao, X. and Zhang, M., 2003. Geochemistry, grouping and origins of crude oils in the Western Pearl River Mouth Basin, offshore South China Sea. *Organic Geochemistry*, 34(7):

- 993-1008. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(03\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(03)00035-4).
- Hunt, J.M., 1996. *Petroleum Geochemistry and Geology*. 2nd Edition, W.H. Freeman and Company, New York, 743.
 - James, G.A. and Wynd, J.G., 1965. Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. *AAPG bulletin*, 49(12): 2182-2245. Doi: <https://doi.org/10.1306/A663388A-16C0-11D7-8645000102C1865D>.
 - Kamali, M. R., Fathi, M. A. and Mohseni-an, E., 2006. Petroleum geochemistry and thermal modeling of Pabdeh Formation in Dezful Embayment. *Journal of science (university of Tehran)*, 32(2), 1-11.
 - Kassler, P., 1973. The Structural and Geomorphic Evolution of the Persian Gulf. In: Purser, B.H. (eds) *The Persian Gulf*. Springer, Berlin, Heidelberg. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-65545-6_2.
 - Kobraei, M., Sadouni, J. and Rabbani, A.R., 2019. Organic geochemical characteristics of Jurassic petroleum system in Abadan Plain and north Dezful zones of the Zagros basin, southwest Iran. *Journal of Earth System Science*, 128(3), 50-68. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12040-019-1082-0>.
 - Konyuhov, A.I. and Maleki, B., 2006. The Persian Gulf Basin: Geological history, sedimentary formations, and petroleum potential. *Lithol Miner Resour* 41, 344-361. Doi: <https://doi.org/10.1134/S0024490206040055>.
 - Langford, F.F. and Blanc-Valleron, M.M., 1990. Interpreting Rock-Eval Pyrolysis Data Using Graphs of Pyrolizable Hydrocarbons vs. Total Organic Carbon. *AAPG bulletin*, 74(6): 799-804. Doi: <https://doi.org/10.1306/0C9B238F-1710-11D7-8645000102C1865D>.
 - Mashhadi, Z.S., Rabbani, A.R., Kamali, M.R., Mirshahani, M. and Khajehzadeh, A., 2015. Burial and thermal maturity modeling of the Middle Cretaceous-Early Miocene petroleum system, Iranian sector of the Persian Gulf. *Petroleum Science*, 12, 367-390. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12182-015-0040-y>.
 - Page, M.M. and Kuhnel, C., 1980. Rock-Eval pyrolysis as source rock screening technique. *AAPG Bulletin*, 64(5): 762-762.
 - Peters, K.E. and Cassa, M.R., 1994. *Applied Source-Rock Geochemistry*. In: Magoon L.B. and Dow W.G. Eds. *The Petroleum System. From Source to Trap*, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, 93-120.
 - Peters, K.E., 1986. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *AAPG bulletin*, 70(3): 318-329. Doi: <https://doi.org/10.1306/94885688-1704-11D7-8645000102C1865D>.
 - Ramachandran, K., Babu, V., Behera, B.K. and Harinarayana, T., 2013. Source rock analysis, thermal maturation and hydrocarbon generation using rock-eval pyrolysis in parts of Krishna-Godavari basin, India: a case study. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 3, 11-20.
 - Smith, J.T., 1994. *Petroleum System Logic as an Exploration Tool in a Frontier Setting*. *AAPG Mem*, 60: 25-49.
 - Talaie, F., Kadkhodaie, A., Arian, M. and Chehrazhi, A., 2023. Geochemical characteristics and oil-oil correlation of the upper Cretaceous oils from the Iranian part of the Persian Gulf Basin. *J Petrol Explor Prod Technol* 13, 2031-2048. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01669-4>.
 - Tissot, B.P. and Welte, D.H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence* Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, New York, Tokio, 699.
 - Waples, D.W., Kamata, H. and Suizu, M., 1992. The art of maturity modeling, part 1: finding a satisfactory geologic model. *AAPG bulletin*, 76(1): 31-46. Doi: <https://doi.org/10.1306/BDF875E-1718-11D7-8645000102C1865D>.

Designing the optimal size of reserve estimation blocks based on different criteria (case study: Mouchesh Zarzima gold deposit)

Ahmadi, R.^{1*} and Shahzamani, H.²

1. MAssistant Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Earth Science and Engineering, Arak University of Technology, Email: Rezaahmadi@gmail.com

2. Master's Student, Department of Mining Engineering, Faculty of Earth Science and Engineering, Arak University of Technology

Received: 2025/01/15

Accepted: 2025/03/16

Abstract

Choosing optimal size of blocks has a significant impact on block model and as a result, accuracy of estimation results for grade and reserve of deposits. In this research, the optimal size of estimation blocks has been determined for block modeling and reserve evaluation of Kurdistan Mouchesh Zarzimai gold deposit. To achieve the goal, in addition to the usual criteria containing exploration grid size and estimation error, the rock quality designation (RQD) parameter was also used. With this approach, the optimal size of each main block was determined 5*5 m and 2 m in the horizontal and vertical directions, respectively, whereas for the sub-blocks, 2.5*2.5 m and 1 m was selected in those directions, respectively. Based on the variography of transformed gold assay data, the theoretical models of spherical, Gaussian, and exponential fitted on the experimental variograms, while the deposit has geometric anisotropy. To estimate the average grade and reserve of the deposit, squared inverse distance and log-kriging methods were used via Datamine software. Employing the squared inverse distance method with the log-kriging is for the possibility of evaluating the accuracy of estimation results through comparison. To control the grade in the various economic conditions, average grade, ore reserve and average estimation variance of the grade were calculated for the cut off grades of 250, 500, 1000 and 2000 mg/ton. The trend of tonnage-grade diagrams of the deposit confirm the correctness of the process. Also, the results of the log-kriging estimation method are more accurate and reliable than the squared inverse distance due to the unbiasedness and lower estimation variance.

Keywords: Mouchesh Zarzima, Rock Quality Designation (RQD), Optimal block size, Block modeling, Estimation Error, Ordinary log-kriging

Selection of Appropriate Zones for Hydraulic Fracturing Operations in the Ilam and Sarvak Formations of an Oil Well in the Southwestern Oil Fields of Iran

Kalhari, M.^{1*}, Gharehcheloo, S.² and Yasemi Khiabani, S.³

1. M MSc. in Petroleum Geology Research Group, Research Institute of Applied Sciences, Tehran, Iran

2. Assistant Professor in Petroleum Geology Research Group, Research Institute of Applied Sciences, Tehran, Iran

3. MSc. in Petroleum Geology Research Group, Research Institute of Applied Sciences, Tehran, Iran

Received: 2025/04/09

Accepted: 2025/07/07

Abstract

Hydraulic fracturing is one of the most widely used well stimulation methods in oil and gas reservoirs worldwide. Economically, selecting the appropriate zone for hydraulic fracturing operations is highly critical. Geomechanical parameters play a significant and influential role in identifying candidate zones. Among the most important geomechanical parameters are the magnitude and orientation of the minimum horizontal stress and the rock mechanical properties of the formation.

In this study, the process of zonation and selecting the optimal zone is investigated using stress zone identification based on minimum horizontal stress, rock mechanical zonation based on rock mechanical parameters, and integrating these results with acceptable thresholds for porosity and permeability.

First, rock mechanical parameters such as Young's modulus, Poisson's ratio, Uniaxial Compressive Strength, fracture toughness, and rock brittleness index were extracted from well logs using various empirical correlations. Hierarchical clustering, as an unsupervised machine learning method, was then applied to these data, resulting in six clusters. Based on these clusters, the reservoir interval was divided into 13 zones labeled A to M.

By calculating the principal stresses and pore pressure, the minimum horizontal stress was used to determine stress zones bounded by stress barriers, identifying six stress zones within the studied interval in the well.

Finally, by analyzing and integrating the results of rock mechanical zonation, stress zonation, and reservoir parameters (porosity and permeability), appropriate zones for hydraulic fracturing were selected. Stress zones 6, 3, and 5 were identified as the most suitable zones for hydraulic fracturing operations.

Keywords: Hydraulic Fracturing, Hierarchical clustering, Rock Mechanical Zonation Stress Barriers, Hydraulic Fracturing Zone Candidate

Biostratigraphy of the Cretaceous deposits based on Calcareous nannofossils in northwest Kerman (Central Iran sedimentary basin)

Notghi Moghaddam, M.¹

1. Associate Professor, Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

Received: 2025/03/02

Accepted: 2025/04/09

Abstract

To study the microbiostratigraphy of Cretaceous deposits in central Iran, the Kuhbanan section in northwest Kerman was selected. Investigated The studied thickness of the Cretaceous deposits in this section is 326 meters and mostly consists of marl and limestone. The studies led to the identification of 17 genera and 38 species of calcareous nannofossils. Based on the index calcareous nannofossils, this section was divided into four standard biozones: *Chiastozygus litterarius* zone, *Prediscosphaera columnata* zone, *Eiffellithus turriseiffelii* zone, and the lower boundary of *Microrhabdulus decoratus* zone. Based on these biozones, the deposits studied in this section span the Aptian to early Cenomanian. The first occurrence of *Microrhabdulus decoratus* along with *Braarudosphaera bigelowii* in the Cenomanian and the last occurrence of *Eiffellithus parvus*, *Lithraphidites alatus*, and *Braarudosphaera africana* in the Cenomanian indicate the transition from the early Cretaceous to the beginning of the late Cretaceous in this section.

Keywords: Central Iran Biostratigraphy, Calcareous nannofossils, Cretaceous, , Kerman

Geochemical Assessment of Arsenic in Water, Soil, and Sediment and Its its Bioaccumulation Relationship in Human Hair, Bardsir Area, Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt

hatefi, R.^{1*}, Asadian, F.², Boosalik, Z.² and Janjaneh, B.²

1. Assistant Professor, Iranian Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad Branch, Iran.

2. Environmental Geology Department, Research Institute of Applied Science, Shahid Beheshti Branch, Iran

Received: 2025/06/22

Accepted: 2025/09/11

Abstract

This study investigates the geochemical behavior of arsenic in environmental media (water, soil, and sediment) and its bioaccumulation in human hair in the Bardsir region, located within the Urumieh-Dokhtar volcanic-plutonic belt of southeastern Iran. A total of 240 samples-including 100 water, 68 soil, 21 sediment, and 102 human hair samples-were collected and analyzed using ICP-MS. The average arsenic concentrations in water, soil, and sediment were 66 $\mu\text{g/L}$, 7 mg/kg, and 5 mg/kg, respectively. In parts of the groundwater, arsenic exceeded the WHO guideline value (10 $\mu\text{g/L}$), indicating geogenic contamination derived from altered and sulfide-bearing volcanic rocks. Approximately 61% of the hair samples contained arsenic at levels above the natural background (1 mg/kg), suggesting chronic exposure of the local population. Correlation and regression analyses revealed a stronger association between arsenic in hair and water ($r= 0.48$, $R^2= 0.23$) than with soil ($r= 0.25$, $R^2= 0.06$) or sediment ($r= 0.14$, $R^2= 0.02$), indicating that groundwater is the primary pathway of arsenic transfer to humans. Geochemically, reducing aquifer conditions (Eh-100 to-200 mV), alkaline pH (9-10), and the presence of permeable NW-SE faults enhance arsenic mobility as As (III). The results indicate that arsenic contamination in the Bardsir area is mainly geogenic, controlled by geological and hydrogeochemical factors, with a clear link to bioaccumulation in humans. This study demonstrates the necessity of continuous groundwater monitoring in altered and volcanic terrains of Iran to mitigate geochemical and public health risks.

Keywords: Arsenic, Environmental Geochemistry, Human Hair Biomarker, Bardsir

Hydrogeological and Hydrochemical Anomalies of Badrud Aquifer, Southeast Kashahn, with Emphasis on Geoelectrical Parameters

Naseri, H.R.^{1*}, Alijani, F.², Darvish Sedehi, M.³ and Falsafi, F.³

1. Professor of Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2. Associate Professor of Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3. M.Sc. Graduate in Hydrogeology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 2025/08/09

Accepted: 2025/09/17

Abstract

This study investigates hydrogeological and hydrochemical anomalies in the Badrood plain aquifer, located in the southeast of Kashan. Given the significant differences in salt concentrations and hydrochemical parameters across various parts of the plain, the potential presence of buried structures such as faults as a cause of hydrogeological anomalies exists. Therefore, an effort has been made to examine the impact of tectonic structures on groundwater resources and to improve the management of these resources in the Badrood plain. The research methodology includes collecting data on electrical conductivity, pH, and temperature (from 40 groundwater samples in two periods: May and June 2018) and employing geoelectric methods using the Schlumberger array in three profiles and 61 sounding points. Data interpretation was performed using IPI2win and RES2DINV software for one-dimensional and two-dimensional modeling of electrical resistivity. The results indicate that the Badrood plain aquifer exhibits significant anomalies in terms of hydrochemical parameters, which do not align with the groundwater flow pattern. Apparent resistivity maps at various depths and electrical tomography sections indicate the presence of at least one possible fault line in the region, which could act as the main cause of hydrochemical anomalies. In the Badrood aquifer, this structural anomaly coincides with hydrochemical variations and, from a hydrogeological perspective, is characterized by a significant difference in the discharge of water wells in the surrounding area. These findings emphasize the need to consider tectonic factors in the planning and management of groundwater resources. Furthermore, by integrating geoelectric methods and hydrochemical analyses, a novel approach is presented for identifying buried geological structures and investigating their effects on the quality and quantity of groundwater.

Keywords: Aquifer, Badrud, Tomography, fault, Anomaly, Hydrogeological Anomaly, Hydrochemistry

Geochemical Evaluation Potential of the Gurpi Formation in the Northwest of the Persian Gulf

Barati Boldaji, S.¹, Sfidari, E.^{2*}, Mehrabi, H.¹, Zamanzadeh, S.M.³ and
Tavakkol, M.H.⁴

1. Master of Science, Petroleum Geology Group, Research Institute of Applied Sciences, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Petroleum Geology Group, Research Institute of Applied Sciences, Tehran, Iran

3. Associate professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

4. PhD in remote sensing, Research Institute of Applied Sciences, Tehran, Iran Professor, Department of Economic Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran

Received: 2025/02/18

Accepted: 2025/05/10

Abstract

The Gurpi Formation in the Persian Gulf Basin presents significant east-to-west geochemical variations due to various tectonic and sedimentary processes. This study has investigated the potential areas for hydrocarbon production of the Gurpi Formation as a possible source rock in the Persian Gulf basin using rock-Eval pyrolysis and vitrinite reflectance. Total organic carbon distribution of the mentioned formation in the Persian Gulf area reveals that this amount has been influenced by basement tectonic processes such as the Qatar-Fars Paleo-high uplift. TOC content increases along the Farzad-C and Forozan fields towards the northwest and eastwards to Oman as well.

The distribution of the mean vitrinite reflectance of the Gurpi Formation in the Persian Gulf area represents the lowest maturity over the Qatar-Fars Paleo-high. Moving from this Paleo-high towards the northwest and east of the Persian Gulf, the maturity increases, reaching its highest value in the northwest. This indicates that the Gurpi Formation is at the onset of oil generation window.

The results of this study indicate that the mentioned formation is primarily located at the beginning of the oil window and has not played a significant role in the hydrocarbon production of the reservoirs in the Persian Gulf in anticline locations. The role of this formation in the deeper syncline areas and its minimal contribution to hydrocarbon production, especially in the northwest of the Persian Gulf, requires further study.

Keywords: Persian Gulf Basin, Source rock, Gurpi



Research Institute of Applied Sciences
(ACECR)



Vol. 19, No. 74, Summer 2025

License Holder:

Research Institute of Applied Sciences (ACECR)

Editorial Director:

Dr. Mirzaei, S., 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)

Executive Director: Janjaneh, B.

Editorial Office Manager: Heydariyan, N., Assistant Professor – Research Institute of Applied Sciences

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

Designer: Ansari, A.

Published: Summer 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) 22431939 – 22431933-4

E-mail: IranianJournalofGeology@gmail.com

Website Journal: Geology.saminattech.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