



پژوهشکده علوم پایه کاربردی



سال ۱۹، شماره ۷۴، تابستان ۱۴۰۴

صاحب امتیاز:

پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاددانشگاهی

مدیر مسئول:

دکتر سعید میرزایی، دانشیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

سردبیر:

دکتر محمدحسین آدابی، استاد دانشگاه شهیدبهشتی

همکار سردبیر:

دکتر حمیدرضا ناصری، استاد دانشگاه شهیدبهشتی

هیئت تحریریه:

دکتر محمدحسین آدابی، استاد دانشگاه شهیدبهشتی

دکتر حمیدرضا ناصری، استاد دانشگاه شهیدبهشتی

دکتر محمدرضا رضایی، استاد دانشگاه کرتین استرالیا

دکتر عزت‌ا... 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 جهاددانشگاهی

دکتر منصور وثوقی عابدینی، دانشیار دانشگاه شهیدبهشتی

دکتر کمال خدایی، دانشیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاددانشگاهی

دکتر اصغر کهندل، دانشیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاددانشگاهی

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

مدیر اجرایی: انسیه اسماعیلی

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 شهیدبهشتی، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاددانشگاهی، صندوق پستی: ۱۹۶۱۵۱۱۷۱

تلفن: ۲۲۴۳۱۹۳۳-۴، ۲۹۹۰۲۵۹۴

پست الکترونیک: zaminshenasiiran@yahoo.com

وب سایت فصلنامه: Journal.rias.ac.ir

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

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

این نشریه در پایه استنادی علوم جهان اسلام و نیز ایران ژورنال (نظام نمایه‌سازی مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی علوم و فناوری) نمایه شده است و دارای ضریب تاثیر می‌باشد. همچنین این نشریه در پایگاه‌های اطلاع‌رسانی زیر قابل 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 zaminshenasiiran@yahoo.com به دفتر مجله ارسال شود (حداکثر تعداد صفحات مقاله ۱۵ صفحه می‌باشد).

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

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

- واژه‌های کلیدی تا پنج مورد به‌ترتیب حروف الفبا 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 حسنی، 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.

نوشتر 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 موچش)

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، تعیین اندازه بهینه بلوک‌های تخمین به‌منظور مدل‌سازی بلوکی و ارزیابی ذخیره کانسار طلای زرزیمای موچش واقع در استان کردستان، صورت گرفته 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. براساس نتیجه‌های، 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 موچش، 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 مدل‌سازی 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.

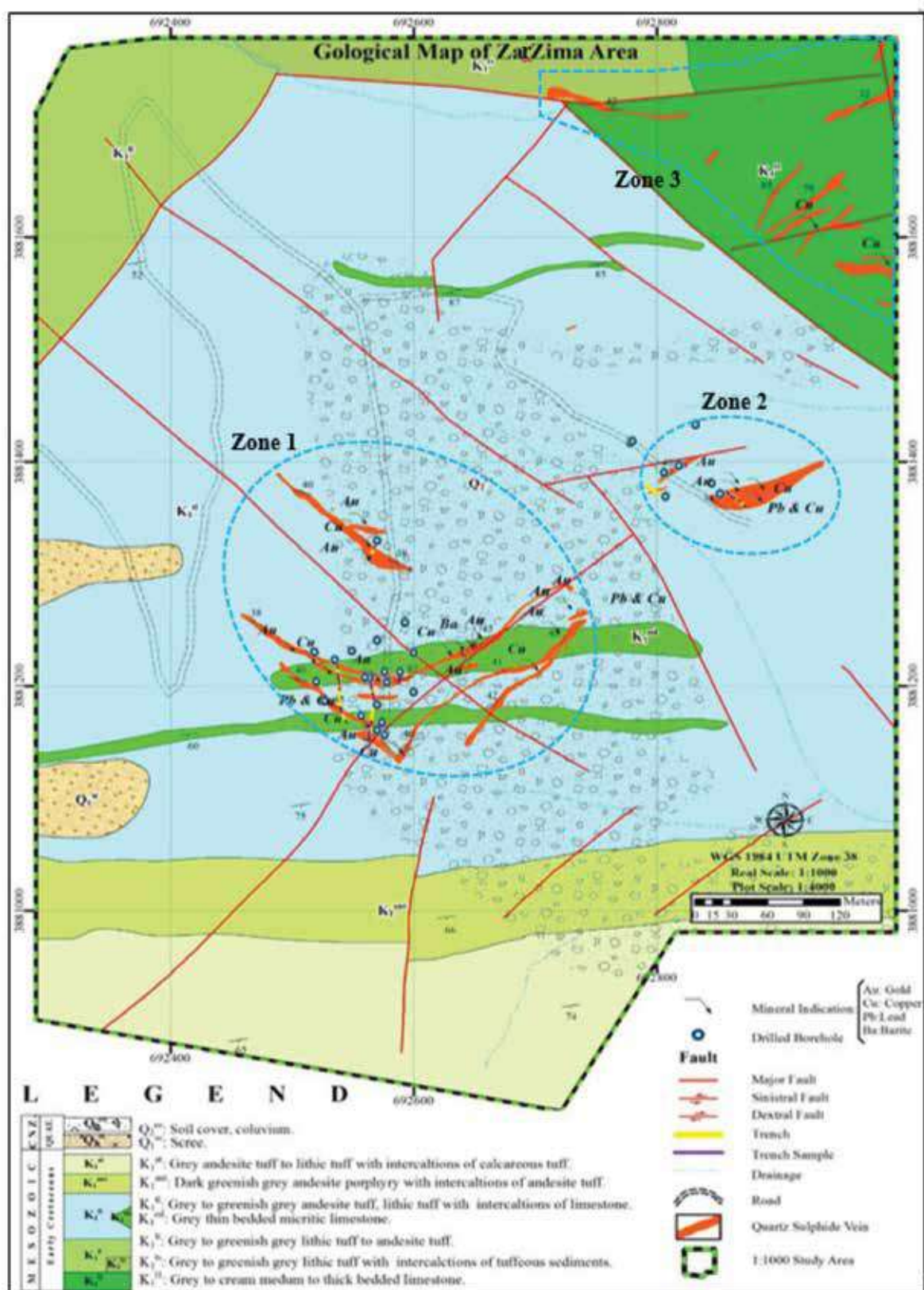
گستره، اغلب شامل ارتفاعات می‌باشد و دشت‌ها در آن جایگاهی ندارند؛ ولی روی رخنمون‌های سنگی در بالای ارتفاعات توسط قشر نازک خاک پوشیده شده است. واحدهای سنگی گستره شامل تناوب سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی است. واحدهای رسوبی شامل سنگ‌آهک خاکستری است که چند متر ضخامت دارد و به‌صورت یک افق در دریای کم‌عمق نهشته 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 گستره مورد مطالعه بر اساس شواهد با حضور گسل‌های معکوس، رانده و رورانده فراوان مشخص شده است. چین‌خوردگی‌های فراوان همراه با گسلش از نوع راندگی، 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 گستره 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 کانسار 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 به‌منظور 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، آنتیموان و غیره (برحسب ppm) مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند.

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

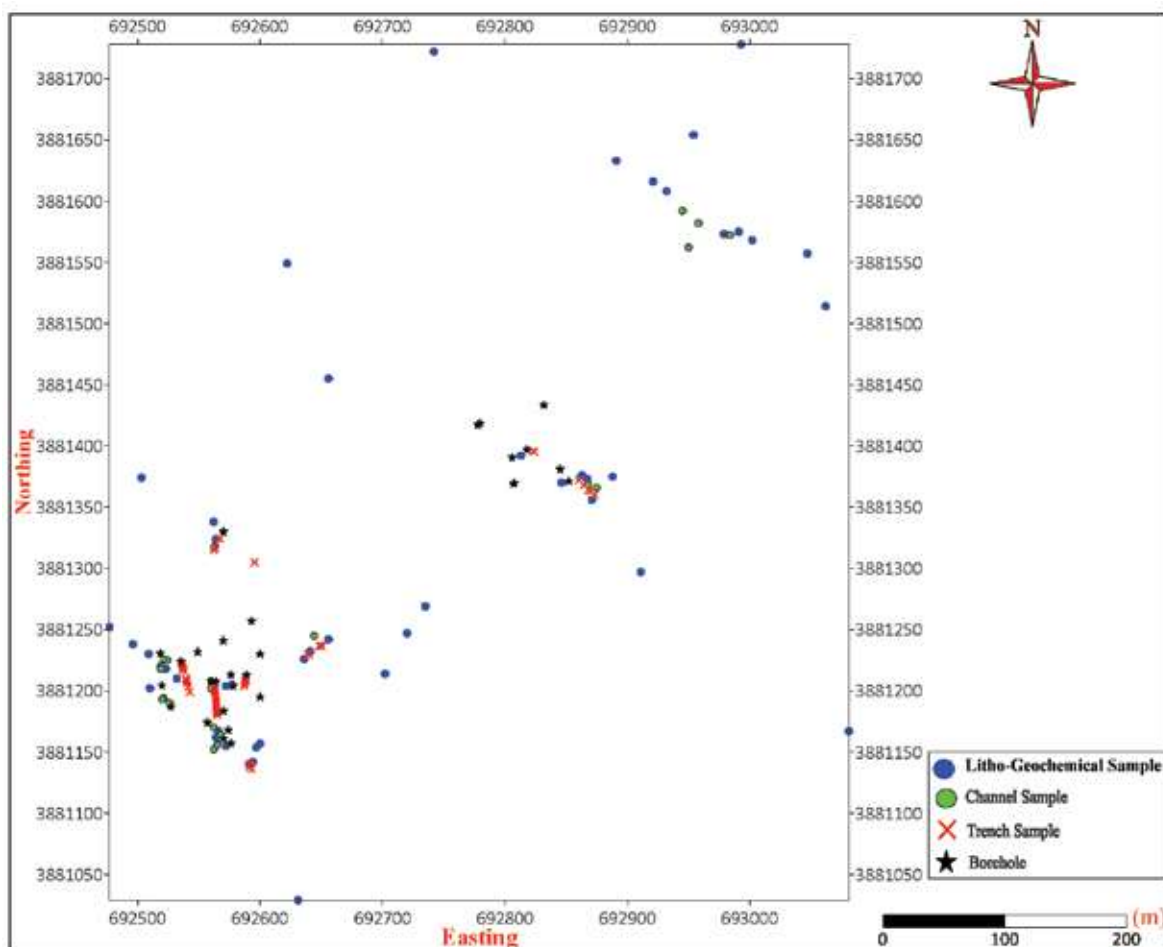
ویژگی‌ها	توصیف	گستره زرزیم
سنگ میزبان	بازالت، آندزیت، ریولیت پورفیری، همراه با سنگ‌های آتشفشانی بایمدال بازالتی-ریولیتی	آندزیت با بین لایه‌های سنگ‌آهک
ارتباط با سنگ‌های نفوذی	حضور توده‌های نفوذی، سیل، دایک‌های کالک‌آلکان تا شوشونیتی	توده‌های گرانودیوریت، دیوریت تا کوارتز مونزونیت در فاصله دو کیلومتری گستره برونزد دارند.
ساختارها	گسل پرشیب، پهنه‌های کششی پهنه فرورانس و ریف‌های پس از برخورد	گسلش اصلی پهنه از نوع گسل‌های معکوس پرشیب است.
پارائز	الکتروم، نقره آزاد، آرژانتیت، پیریت، کالکوپیریت، پیرویت، آرسنوپیریت، پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، اسفالریت، گالن، کانی‌های سلنید و تلورید (نادر)، کائولینیت، کلریت، کوارتز کراستیفرم، کالسدون، کلسیت تیغه‌ای، آدولاریا، سریسیت، باریت و فلوریت	پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، اسفالریت، گالن، کانی‌های سلنید و تلورید (نادر)، کائولینیت، کلریت، کوارتز کراستیفرم، کالسدون، 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، کالسدون)، 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, Au, As, 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.

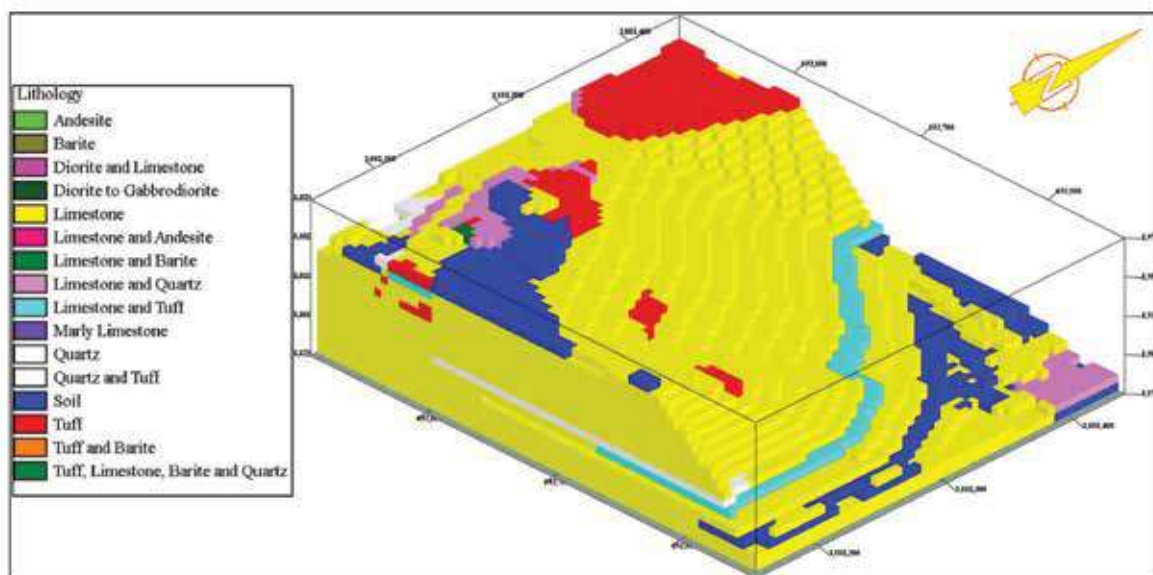
مدل سازی پارامتر شاخص کیفی سنگ

ازجمله 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;

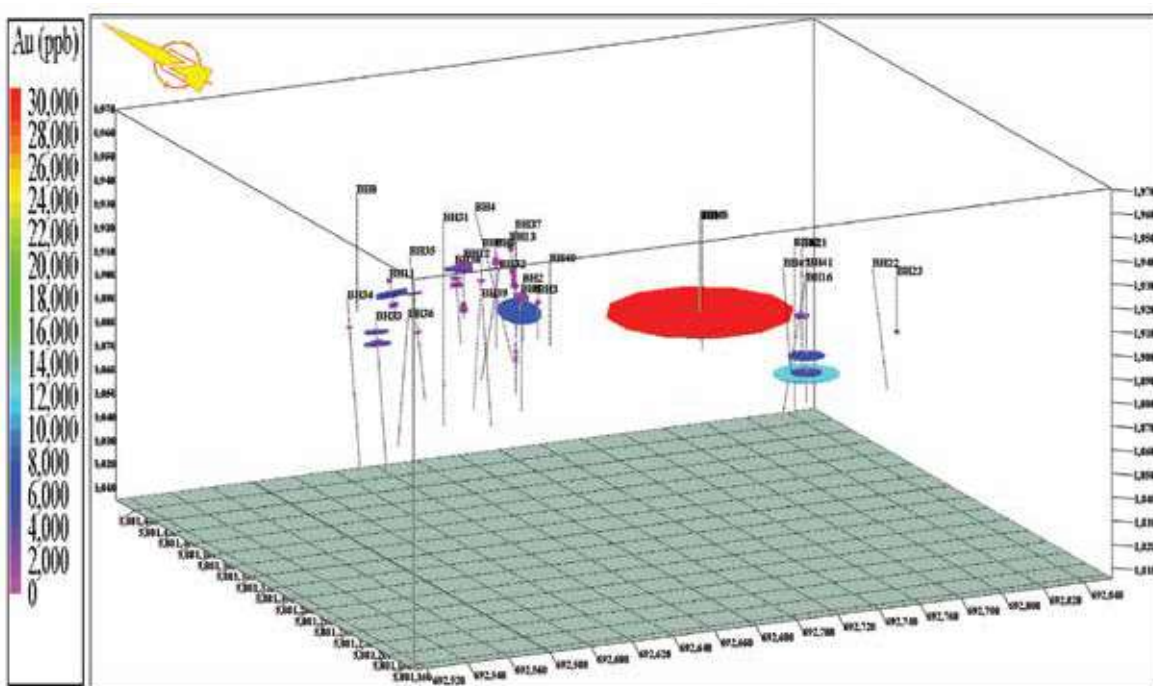
براساس مطالعات چشمی مغزه‌ها، مشخصات زمین‌شناسی شامل کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی، دگرسانی‌ها، رنگ ظاهری و غیره و نیز با استفاده از داده‌های عیارسنجی حاصل از تجزیه شیمیایی مغزه‌ها، ابتدا به کمک نرم‌افزار Rockworks از طریق رسم چاه‌نگار^۱ سه‌بعدی عیارسنجی گمانه‌ها و مدل سه‌بعدی لیتولوژی شناخت کاملی از کانسار طلای 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)



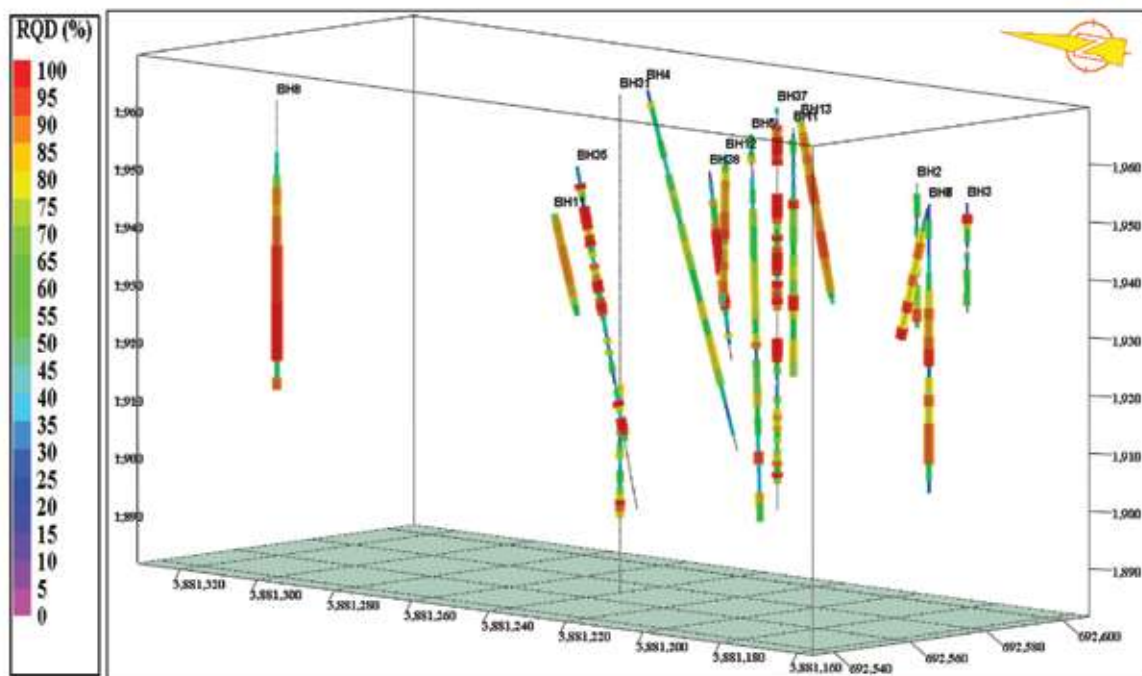
شکل ۴. نمایش سه بعدی چاه‌نگار عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی کل کانسار طلای زرزیمای موش

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

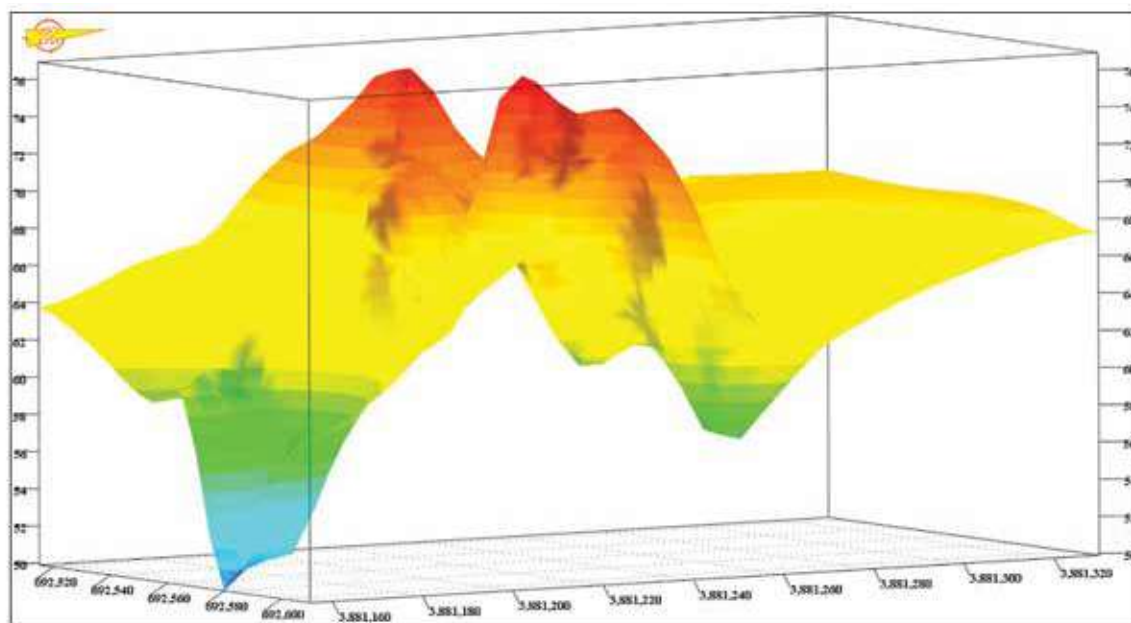
Hencher, 2015; Jaeger et al., 2007; Carter, 1992; Goodman, 1991; Bieniawski, 1989; Deere, 1989, 1963 و با روش‌های مختلفی تعیین می‌شود (Xu et al., 2023).

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

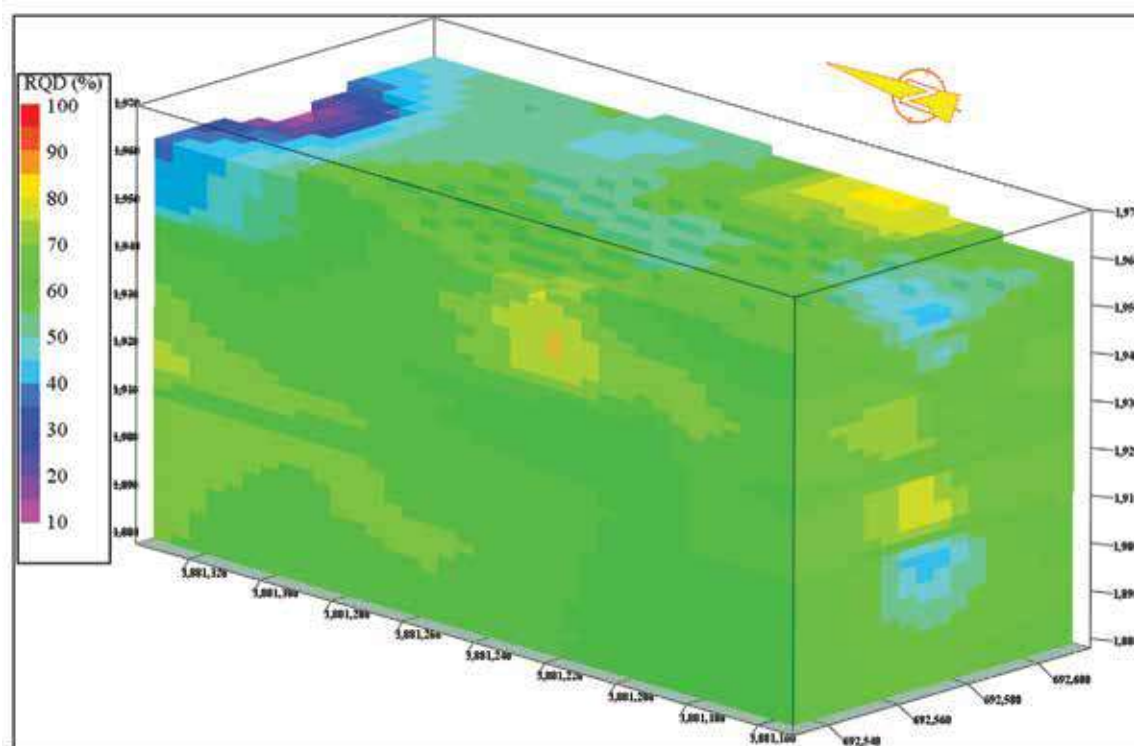
1. Cold
2. Hot

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 زرزیم‌ناشان داده شده است. برای ساخت این مدل نیز از یک مدل شبکه‌ای مکعب مستطیلی شکل به ابعاد $۷۵ \times ۱۷۵ \times ۸۸$ متر با سلول‌های $۵ \times ۵ \times ۲$ 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 $۳/۵$ 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 گستره مورد مطالعه با کمترین مقدار ۱۰ و بیشترین مقدار ۱۰۰ درصد به ۱۸ گستره رنگی با رنگ‌های

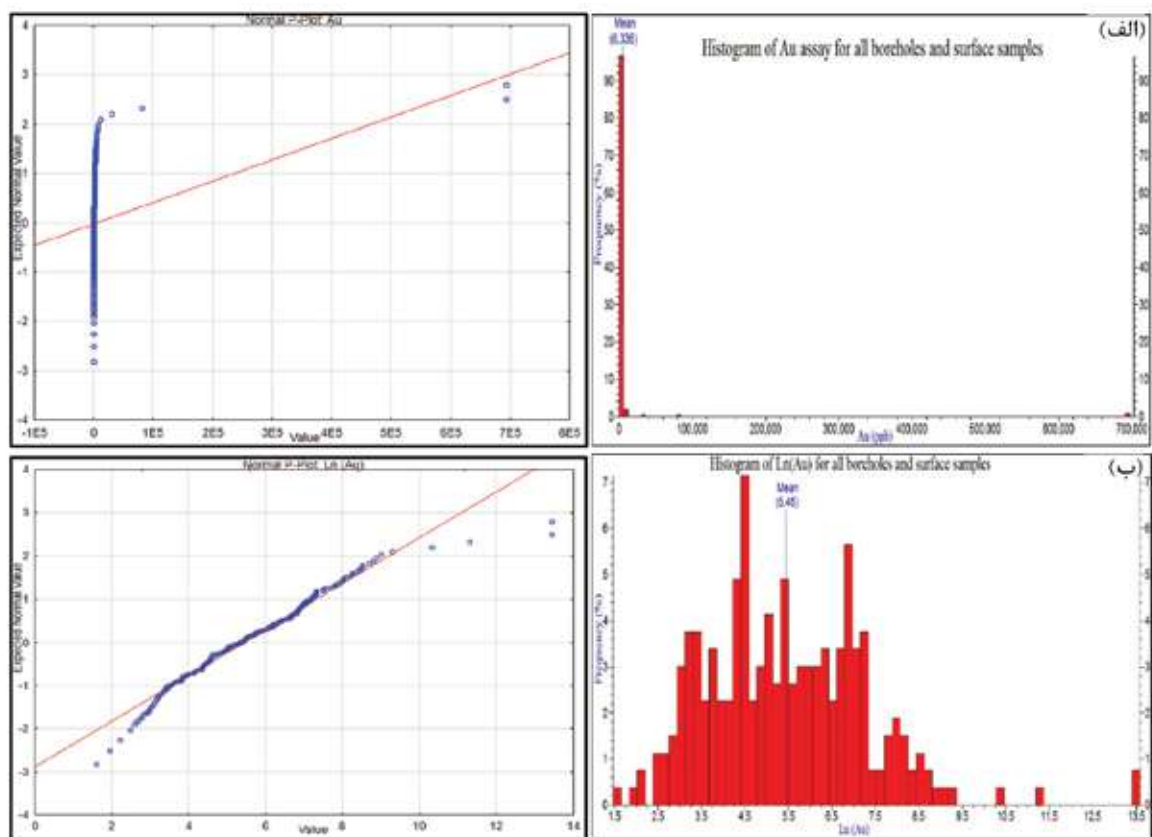


شکل ۷. مدل سه‌بعدی داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیم‌ناشان

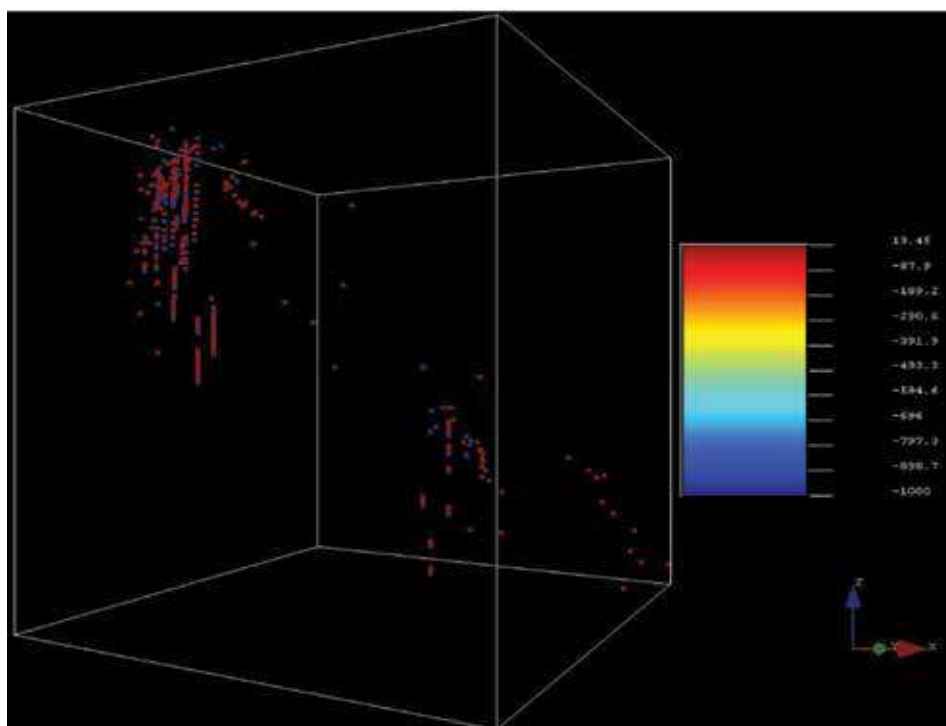
(2006 نشان داده شده است. در این شکل ابعاد شبکه (بلوک بزرگ) دربرگیرنده داده‌ها، $۲۶۰ \times ۳۵۱ \times ۱۳۵$ متر و اندازه هر سلول $۲ \times ۲ \times ۱$ متر انتخاب شده است. همچنین به منظور دید بهتر، ارتفاع گمانه‌ها تا پنج برابر بزرگ‌نمایی شده است.

در شکل ۹ موقعیت پراکندگی سه‌بعدی نمونه‌های سطحی و ۳۰ حلقه گمانه اکتشافی برداشت شده در سطح گستره کانسار طلای زرزیم‌ناشان 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

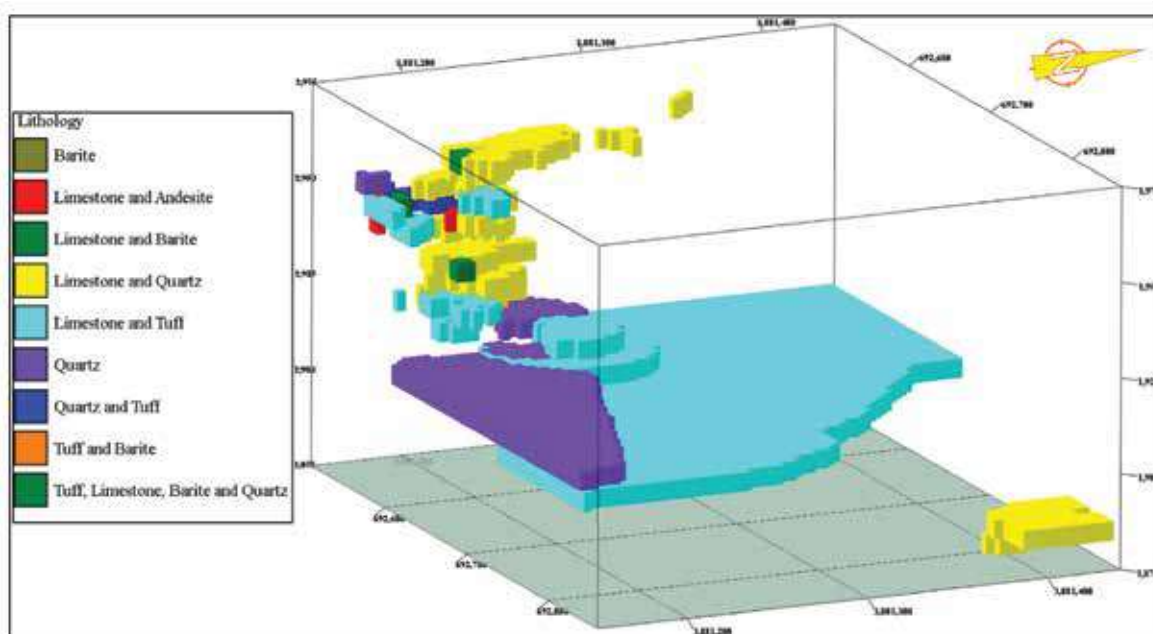


شکل ۹. نمایش موقعیت فضایی لگاریتم داده‌های عیارسنجی طلای نمونه‌های سطحی و گمانه‌های اکتشافی کانسار زرزیمای موجش درون گستره بلوکی در نرم‌افزار SGeMS

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



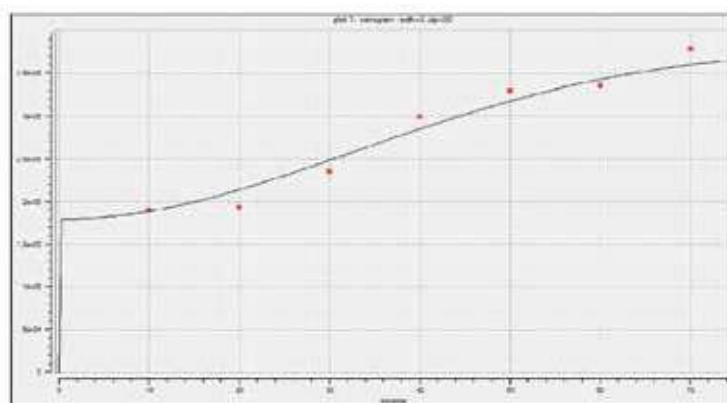
شکل ۱۰. مدل جامد ماده معدنی کانسار طلای زرزیماي موش به کمک لیتولوژی

تجزیه و تحلیل ساختار فضایی داده‌های عیارسنجی طلا

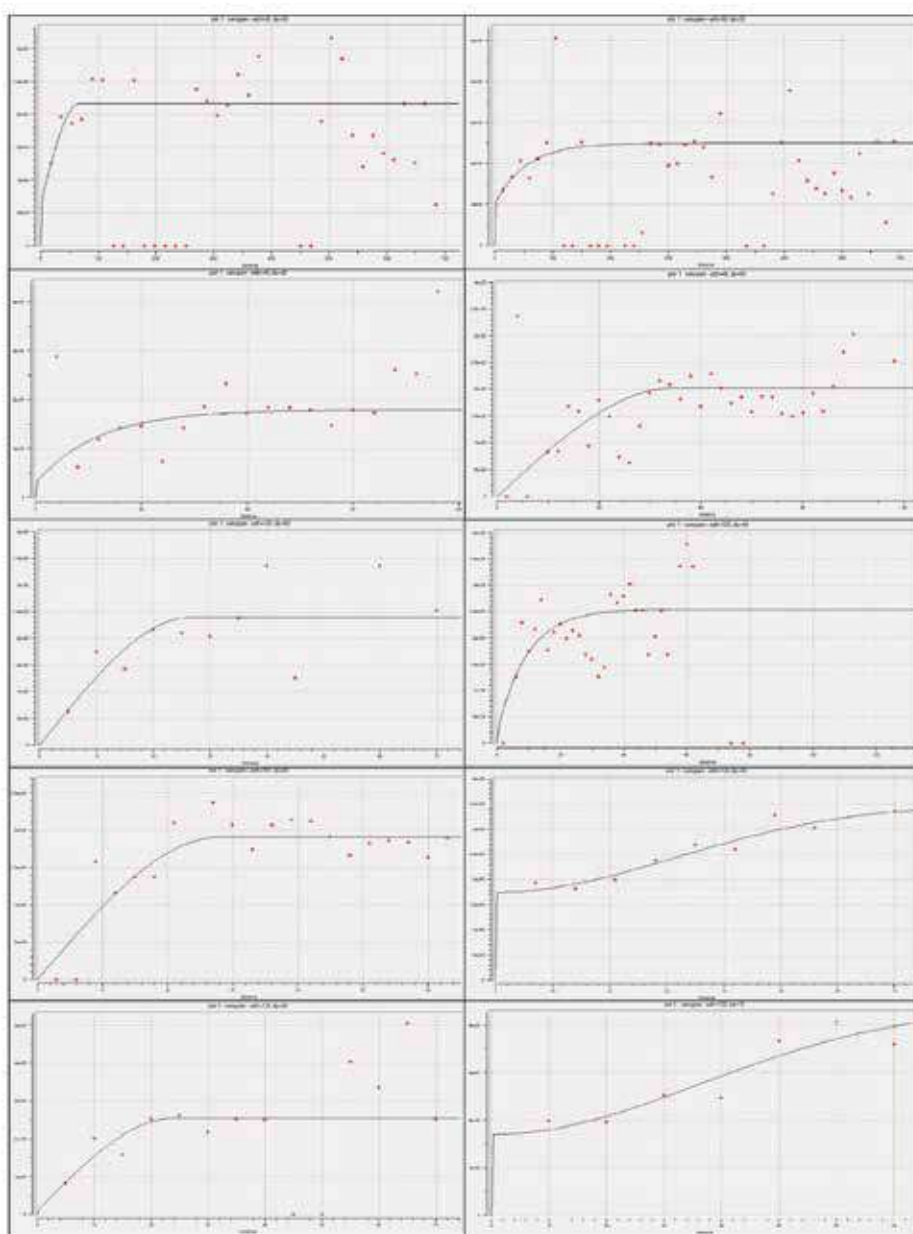
داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ساختار فضایی حاکم بر توزیع عیار در این گستره در فواصل کم به‌خوبی در تغییرنما عمقی پدیدار شده است. به‌منظور تجزیه و تحلیل ساختار فضایی گستره به‌جز تغییرنما در راستای عمقی، تغییرنماهای امتدادی با آزمون‌های ۴۰، ۴۵، ۱۲۰، ۱۳۰ و ۱۳۵ درجه نیز رسم شد. نمودار تغییرنماهای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

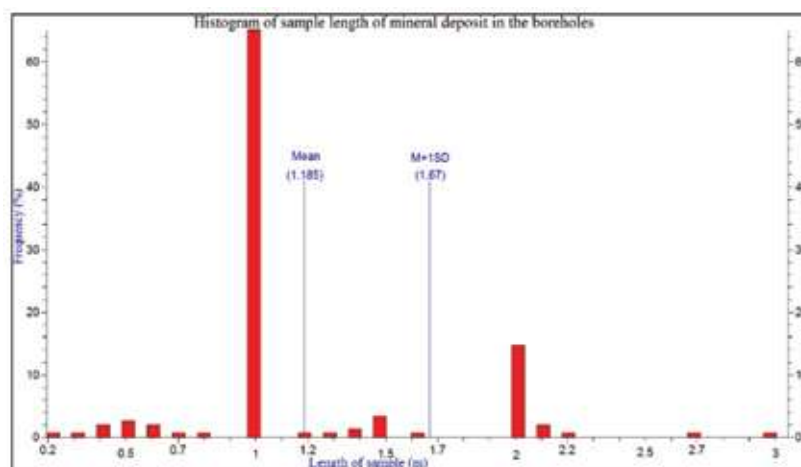
جدول ۳. مشخصات بیضوی جستجو

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 گستره 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 ۰.۹۵٪ 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

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):

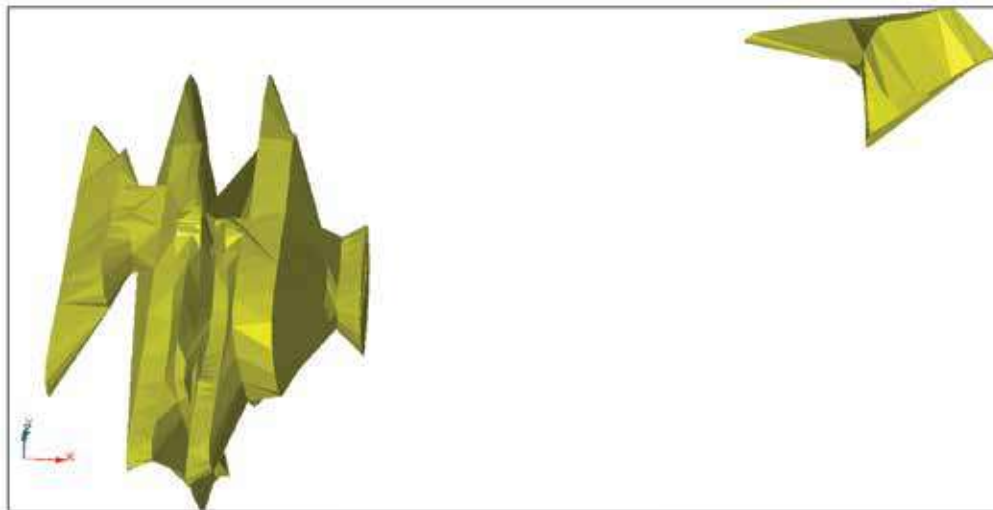
$$S = (1-2)B$$

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

(۲) کانسارهای فلزی همانند طلا، مس، سرب، روی و آهن ابتدا



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

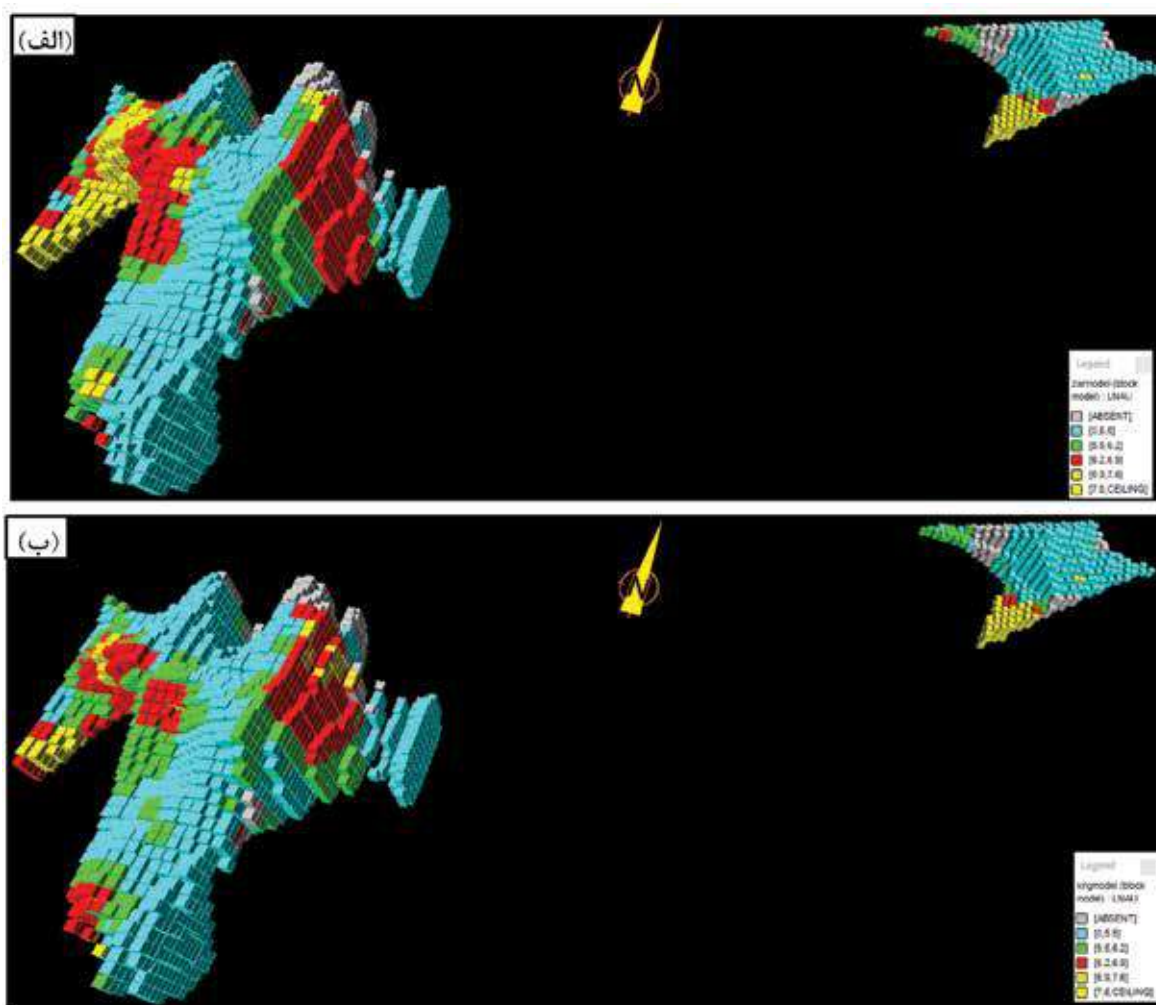
پارامتر		مقدار (متر)
اندازه و ابعاد پهنه ۱	طول	۲۹۵
	عرض	۲۱۰
اندازه و ابعاد پهنه ۲	طول	۱۷۰
	عرض	۹۰
اندازه شبکه گمانه‌های اکتشافی		۲۵×۲۵
طراحی اندازه شبکه چال‌های آتشباری و انفجار بر اساس RQD		۵×۵
اندازه و ابعاد بلوک‌های تخمین		۵×۵×۲
اندازه و ابعاد زیر بلوک‌های تخمین		۲/۵×۲/۵×۱

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 به منظور 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

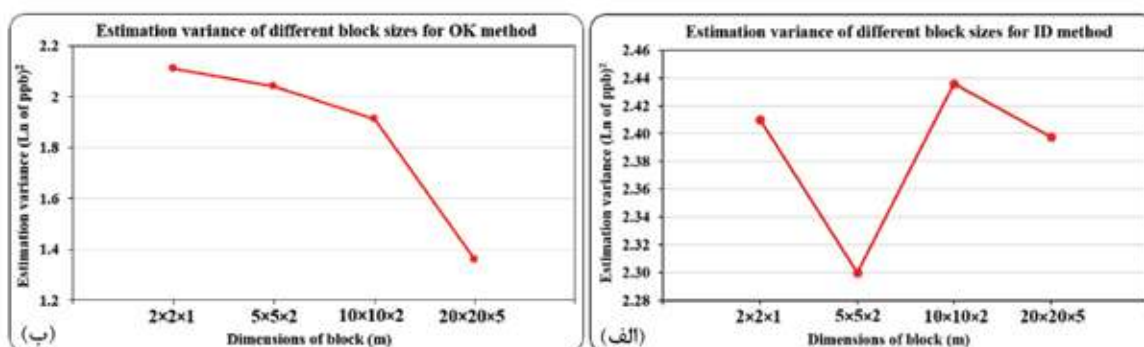


شکل ۱۵. مدل بلوکی عیار کانسار طلای زرزیم با روش‌های (الف) عکس مجذور فاصله، (ب) لاگ کریجینگ معمولی

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

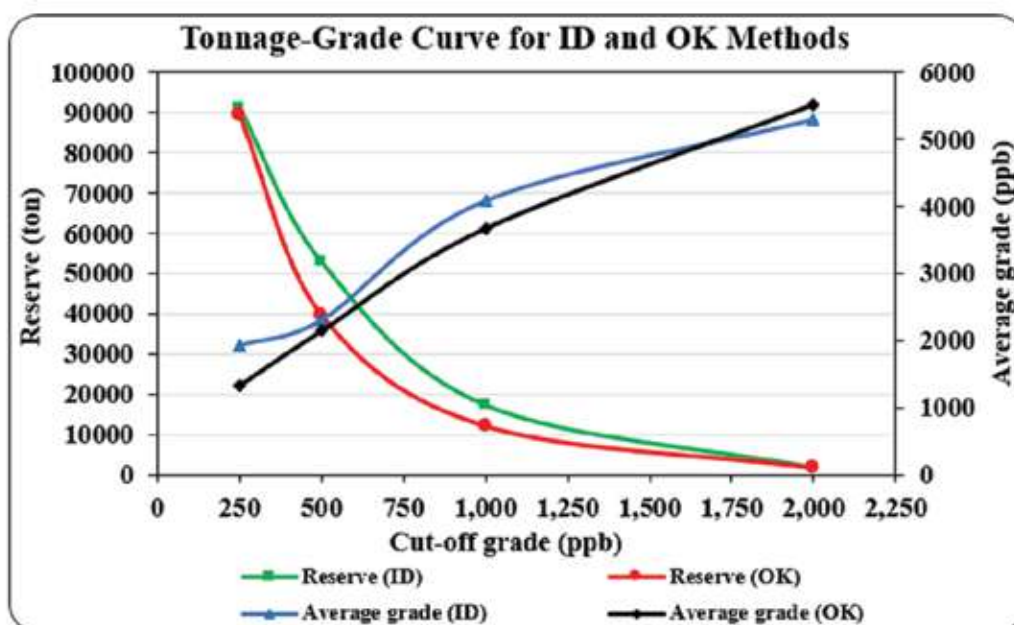
جدول ۵. نتیجه‌های تخمین ذخیره کانسار طلای زرزیم با روش‌های مختلف

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 می‌نمایند.

اما پاسخ این سوال که کدام روش بهتر بوده 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 به‌منظور 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

گستره 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 به‌منظور 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 زون مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی در سازندهای ایلام و سرک 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

شکافت هیدرولیکی یکی از روش‌های انگیزش چاه است که به‌صورت گسترده در مخازن نفتی و گازی دنیا در حال انجام می‌باشد. انتخاب زون مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی از نظر اقتصادی بسیار کلیدی است. پارامترهای ژئومکانیکی در انتخاب زون‌های کاندید بسیار مؤثر و پر اهمیت می‌باشند. از جمله مهم‌ترین پارامترهای ژئومکانیکی می‌توان به اندازه و جهت‌یابی تنش افقی مینیمم و خواص مکانیک سنگی سازند اشاره کرد. در این مطالعه، چگونگی زون‌بندی و انتخاب زون مناسب، با استفاده از تعیین زون‌های تنشی از تنش افقی مینیمم، تعیین زون‌های مکانیک سنگی با استفاده از پارامترهای مکانیک سنگی و با تلفیق این نتایج با حد برش‌های مجاز برای تخلخل و تروایی 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 زون A تا M تقسیم‌بندی شده است. با محاسبه مقادیر تنش‌های اصلی و فشار منفذی، از تنش افقی مینیمم برای تعیین زون‌های تنشی که با موانع تنشی محدود شده‌اند استفاده شده است که برای بازه مورد مطالعه در چاه شش زون تنشی مشخص شده است. با بررسی و تلفیق نتایج زون‌بندی مکانیک سنگی، زون‌های تنشی و پارامترهای مخزنی تخلخل و تروایی به انتخاب زون‌های مناسب برای شکافت هیدرولیکی پرداخته شده است که زون‌های تنشی شش، سه، و پنج به‌عنوان مناسب‌ترین زون‌ها انتخاب شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: شکافت هیدرولیکی، خوشه‌بندی سلسله مراتبی، زون‌بندی مکانیک سنگی، موانع تنشی، زون کاندید شکافت هیدرولیکی.

مقدمه

در صورت استخراج پروفیل پیوسته‌ای از مهم‌ترین پارامترهای مکانیک سنگی برای هر چاه، می‌توان برای آن، زون‌های مکانیک سنگی تعیین کرد که هر زون ویژگی‌های مکانیک سنگی کم‌وبیش یکنواختی دارد و میزان مقاومت و استحکام هر زون مشخص است. برای تعیین این زون‌ها 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 زون‌بندی مکانیک سنگی می‌توان زون‌های مناسب برای شکافت هیدرولیکی را تعیین کرد.

زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه

میدان مورد مطالعه در جنوب غربی ایران با روند شمال غربی-جنوب شرقی، به‌موازات 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

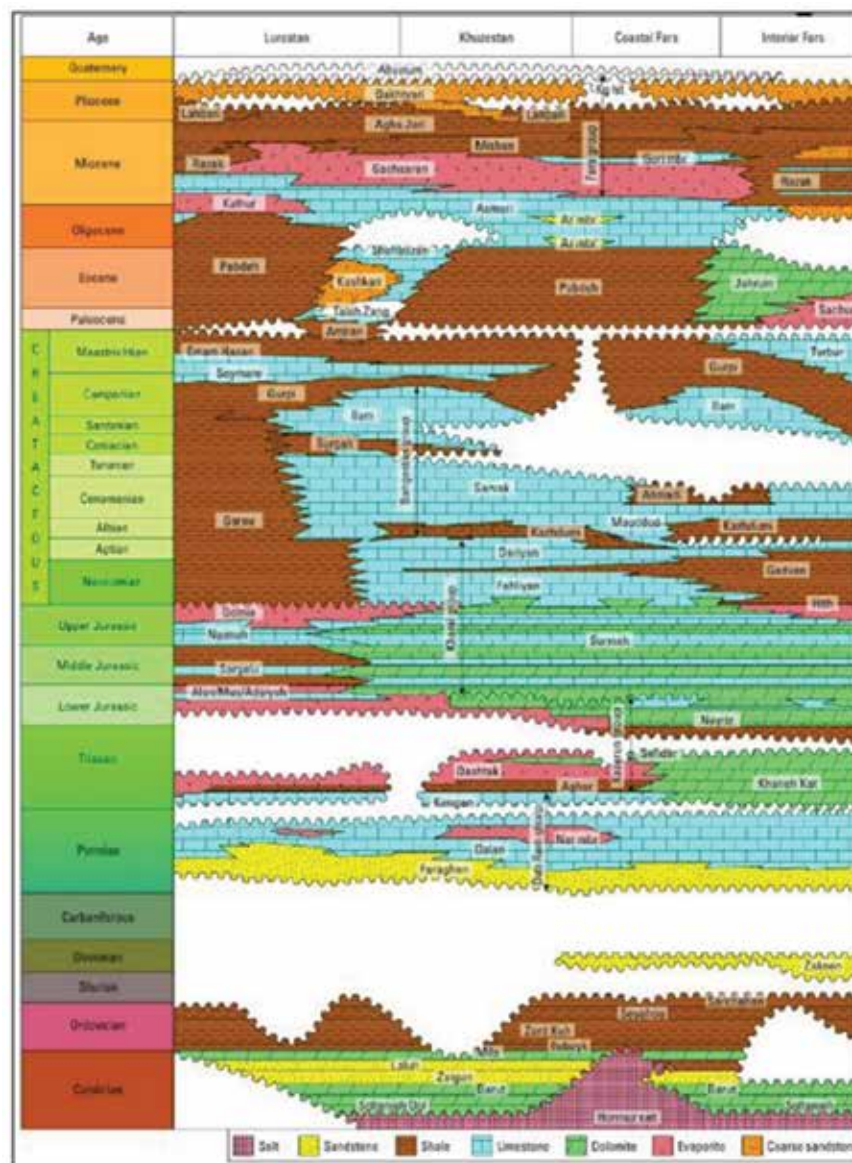
سازند ایلام با دو رخساره عمیق و کم‌عمق دیده می‌شود. برش الگوی این سازند که نشانگر رخساره عمیق است در بخش شمال باختری کبیرکوه در ۱۲ کیلومتری

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, 2005; Legartha et al., 1989; Hibbeler, and Rae, 2005). تعیین فواصل مناسب برای شکافت هیدرولیکی شامل ارزیابی خواص سنگ، با شناسایی بهترین فواصل عمقی برای انجام شکافت هیدرولیکی است. اگرچه پارامترهای بسیاری در شناسایی زون‌های 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 تحقیق در این است که با انتخاب دقیق زون‌های مناسب برای شکافت هیدرولیکی، می‌توان بهره‌وری چاه‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش داد و از افت تولید جلوگیری کرد.

در تحقیقات 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 (Warpsinski et al., 1982; Jahandideh et al., 2016). به‌تازگی، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تحلیل و شناسایی زون‌های 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 تحقیق، استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای شناسایی دقیق‌تر زون‌های 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 می‌باشد

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 کمپانین دارد. سازند ایلام در میدان مورد مطالعه ضخامت در حدود ۱۸۵ متر دارد. این سازند به صورت هتروژن بوده و متشکل از رخساره‌های کربناته کم‌عمق تا عمیق شامل، دانه‌های اسکلتی (روزن‌داران پلانکتونیک و بنتیک، جلبک

زون‌های مخزنی سازند ایلام و سروک

سازند ایلام به سه زون مخزنی (A, B, C) بخش شده است. البته زون C دارای سه زیر زون می‌باشد. در مخزن ایلام زون A و B دارای آب اشباع‌شدگی بالای ۴۰ درصد بوده اما زون C مقدار آب اشباع‌شدگی کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد. همچنین سایر زون‌ها به‌جز زون‌های C1 و C2 تخلخل بسیار پایینی دارند. لذا از نظر پتروفیزیکی زون C1 مخزن ایلام مناسب‌ترین زون تولیدی می‌باشد. مخزن سروک نیز به شش زون (D, E, F, G, H, I) به همراه تعدادی زیر زون بخش شده است. این مخزن آب اشباع‌شدگی از ۳۰ تا ۴۵ درصدی و تخلخل کمتر از شش درصد دارد، به‌جز زون I2 که تخلخل در حدود ۱۱ درصد و آب اشباع‌شدگی ۳۲ درصدی دارد. لذا زون I2 یکی از مناسب‌ترین زون‌های تولیدی مخزن سروک می‌باشد. اطلاعات جزئی‌تر از زون‌های 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 میلیوئیدی، 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 خصوصیات پتروفیزیکی در زون‌های 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
	I1-1	۳۲	۰/۰۴۱	۴۲/۶	۶/۶	۴/۵
	I1-2	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 تست مکانیک سنگی مقاومت فشاری تک‌محوره، همچنین داده‌های تست چاه^۱ RFT و^۲ FIT 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 تست‌های 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 زون‌های مکانیک سنگی استفاده می‌شود. لذا با استفاده از روابط و نتایج تست‌های چاه مقادیر تنش‌های اصلی و فشار منفذی محاسبه شده و از پروفیل تنش افقی مینیمم و زون‌های ژئومکانیکی برای تعیین زون‌های کاندید استفاده خواهد شد. با مطالعه و بررسی زون‌های مکانیک سنگی تعدادی زون انتخاب خواهند شد و با تلفیق نتایج وضعیت تنش افقی مینیمم و موانع تنش زون‌های مناسب‌تر انتخاب می‌شوند. در نهایت با استفاده از محدودیت‌های لازم از لحاظ پارامترهای مخزنی تخلخل و تولید آب از میان زون‌های تعیین شده، زون‌های نهایی کاندید معرفی خواهند شد.

استخراج پارامترهای مکانیک سنگی

استخراج پارامترهای مکانیک سنگی 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 تست‌های 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):

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

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

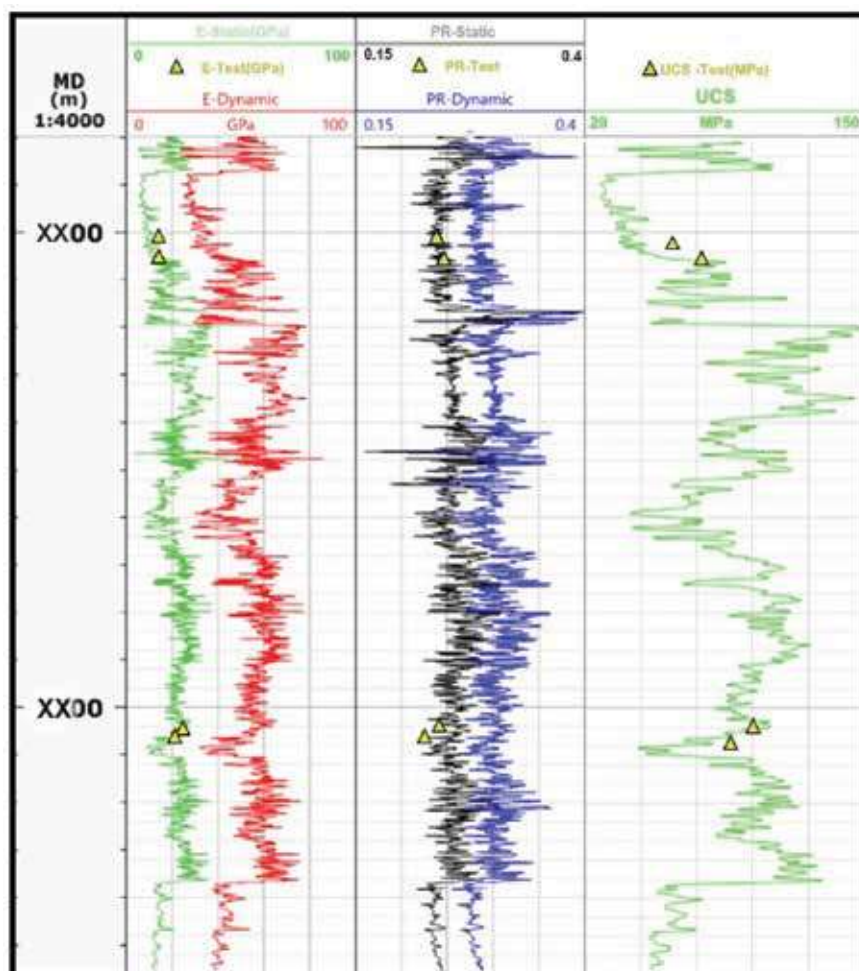
در این روابط V_s و V_p به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی برحسب $\text{ft}/\mu\text{s}$ و چگالی (ρ) برحسب gr/cm هستند. این پارامترها سپس از طریق روابط تجربی و داده‌های مغزه به پارامترهای استاتیکی تبدیل می‌شوند. در این مطالعه پارامترهای الاستیک سنگ، شامل مدول یانگ ابتدا با استفاده از نگاره‌های چاه، شامل سرعت

1. Repeat Formation Tester

2. Formation Integrity Test

انتخاب زون 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 تست‌ها

همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است مقادیر استاتیک محاسبه شده از روابط تجربی انطباق مناسبی با نتایج تست‌های 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 تست آزمایشگاهی نمونه‌های سنگی حاصل از مغزه چاه به دست می‌آید. از آنجایی که مغزه‌های چاه کمیاب هستند و تست‌های آزمایشگاهی گران قیمت می‌باشند و همچنین نتایج این تست‌های 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 زون‌های 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 زون‌های 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., 2015, Meng et al., 2015, Huang et al., 2014). برای محاسبه اندیس شکنندگی در این مطالعه از رابطه ۷ استفاده شده است:

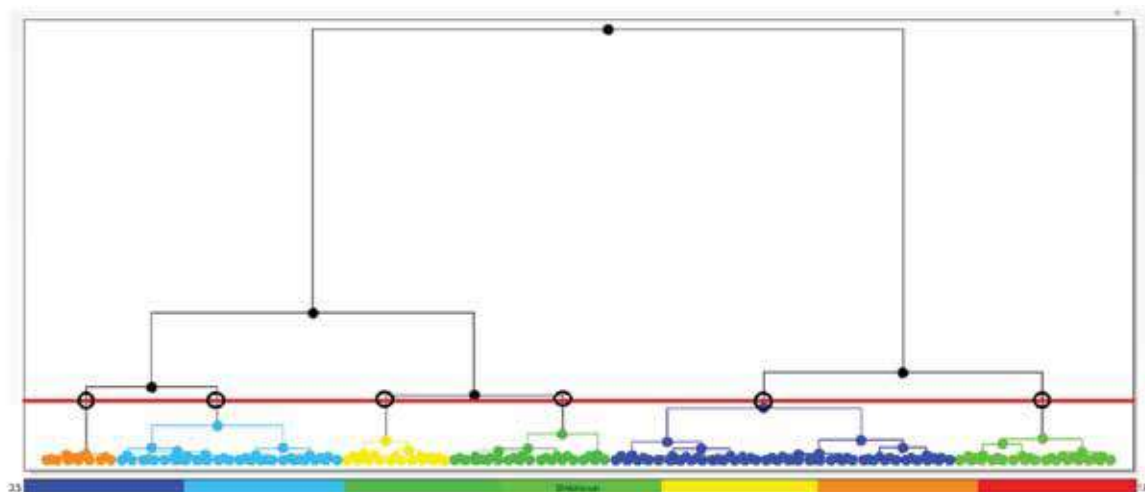
$$BI = \frac{UCS - \sigma_t}{UCS + \sigma_t} \quad (7)$$

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

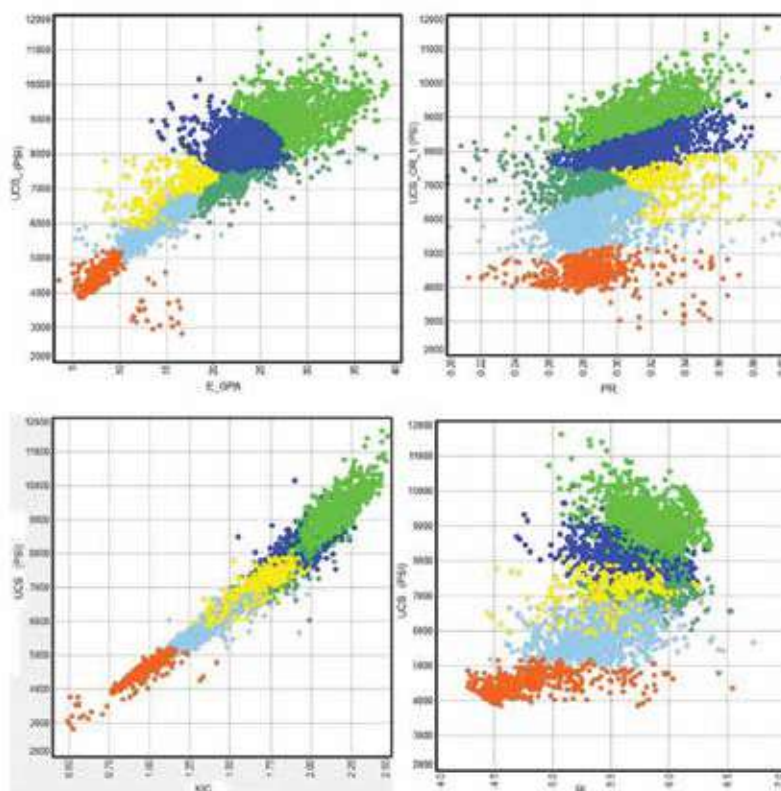
1. Fracture Toughness
2. Brittleness Index
3. Brittleness Index

انتخاب زون 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 زون‌بندی مکانیک سنگی فراهم شد. پس از مشخص شدن زون‌های مکانیک سنگی، با بررسی خواص مکانیکی هر زون از لحاظ پارامترهای مکانیک سنگی، زون‌های با مقاومت بیشتر و زون‌های ضعیف‌تر مشخص می‌شوند و تصمیم‌گیری برای انتخاب زون مناسب انجام شد.



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

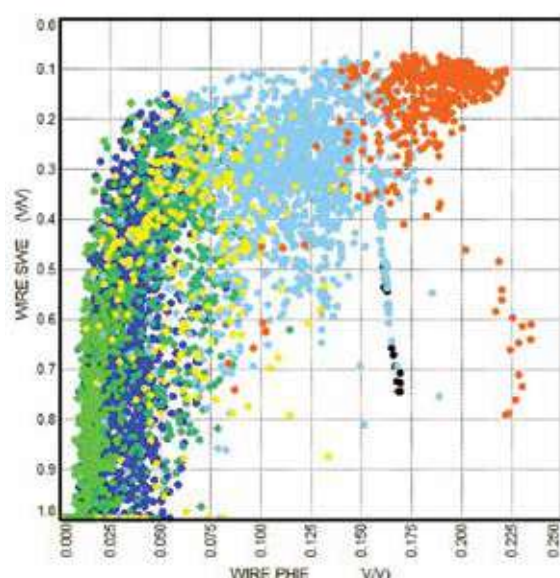


شکل ۴. رسم دو بعدی تعدادی از متغیرهای ورودی خوشه‌بندی

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

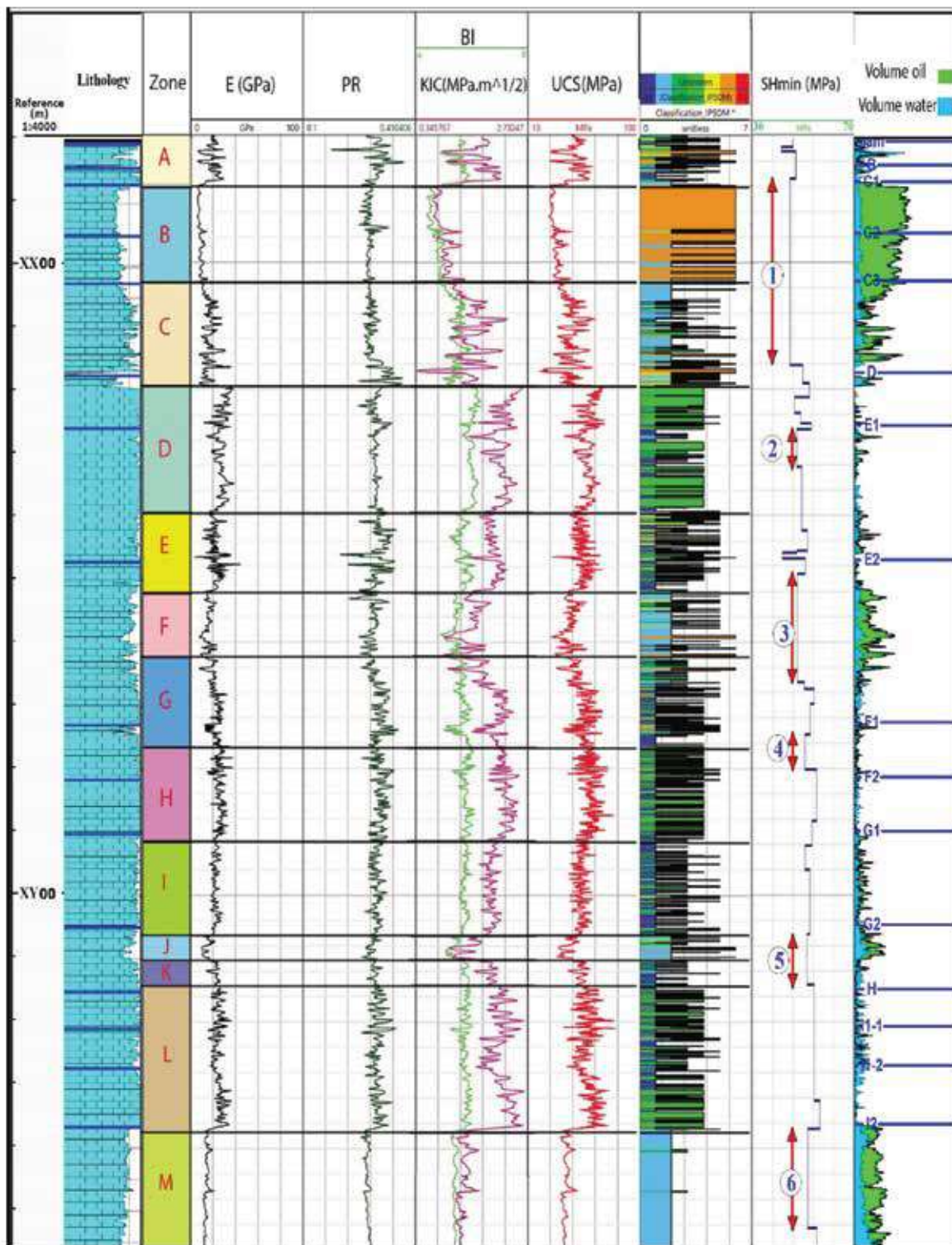
در شکل ۶ گونه‌های مکانیکی به همراه پارامترهای مکانیک سنگی استفاده شده، نشان داده شده است. بر اساس این خوشه‌بندی بازه مورد مطالعه به ۱۳ زون بخش شده است. که از A تا M نام‌گذاری شده‌اند. از میان این زون‌ها پنج زون J، F، C، B و M از خوشه‌های دو و شش تشکیل شده‌اند که دارای کمترین شاخص‌های مقاومتی سنگ هستند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

از طرفی بررسی گونه‌های مکانیک سنگی از لحاظ تخلخل و تراوایی اهمیت بسزایی در انتخاب زون‌های 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 زون مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی در سازندهای ایلام و سروک ...

زمین است. این رابطه مقدار گرادیان نفت برابر با 0.35 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 زون‌های تعیین شده برای چاه مورد مطالعه

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

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

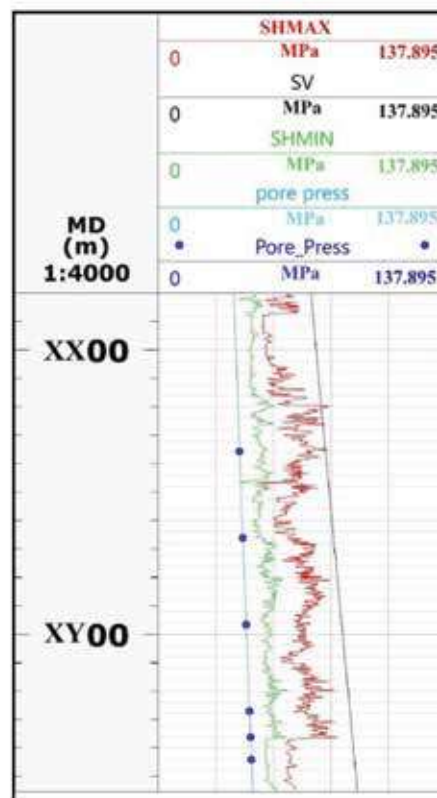
در این روابط ϑ ضریب پواسون، α ضریب بایوت، P_p فشار منفذی و σ_v تنش عمودی برحسب MPa، E_{sta} مدول الاستیسیته استاتیک برحسب GPa و ε_x ، ε_y به ترتیب کرنش نکتونیکی در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر است. مقادیر تنش‌های افقی و قائم در چاه مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است.

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.

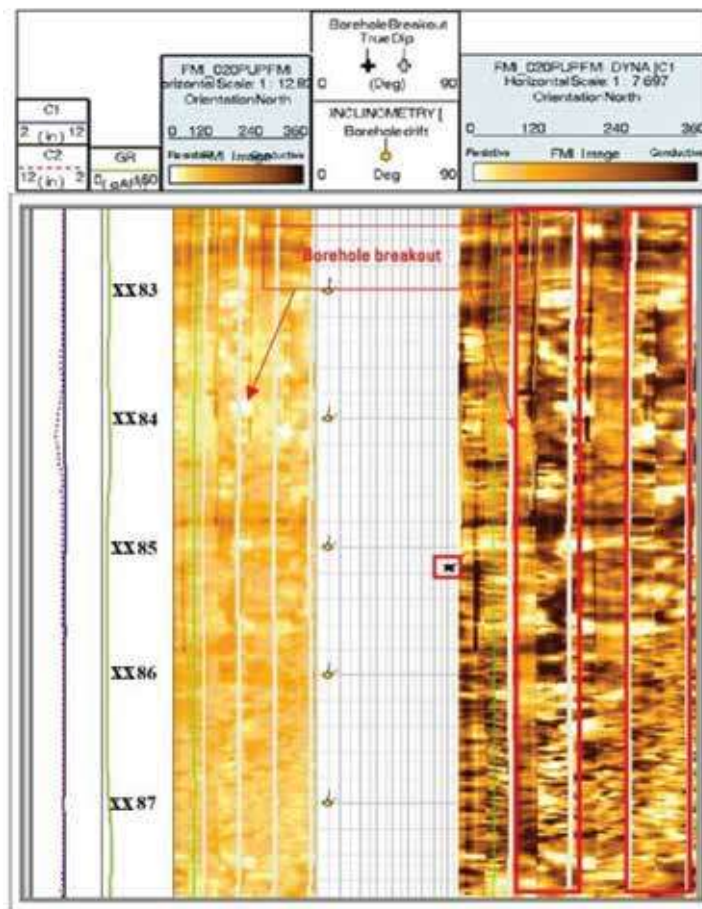
تنش‌های افقی

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):

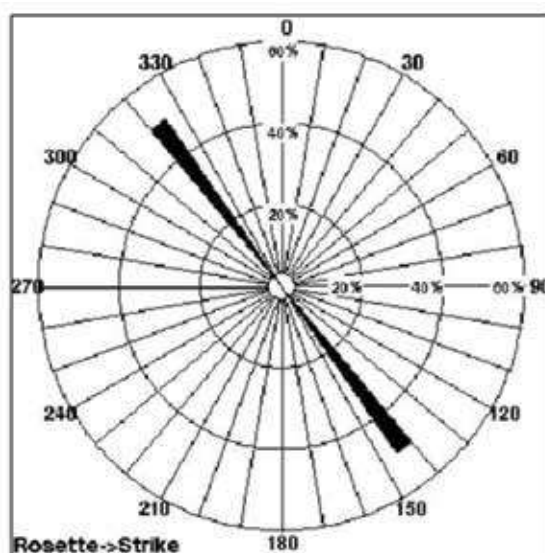
1. Oil-based microimager
2. Ultrasonic Borehole Imager

انتخاب زون 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 زون‌های تنش دو و چهار به دلیل اینکه در زون‌های مکانیک سنگی مقاوم D و G واقع شده‌اند، حذف می‌شوند. در مطالعات جامع شکافت هیدرولیکی سنگ مخزن پارامترهای مکانیک سنگی، تنش‌های موجود، خصوصیات پتروفیزیکی از قبیل تخلخل، اشباع‌شدگی، تراوایی نیز جهت انتخاب زون مناسب مخزنی 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). زون‌هایی که تولید طبیعی آنها از نظر اقتصادی بسیار قابل توجه است و همچنین زون‌هایی که اشباع آب آنها بالاست، جز الویت‌های آخر قرار گرفته‌اند (شکل ۶). برای بخش بالایی زون تنش یک (معادل زون 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 زون‌های تنش سه، پنج و شش به نظر برای انجام عملیات مناسب به نظر می‌رسند.^۱

نتیجه‌گیری

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

- زون‌های M و B نسبت به زون‌های دیگر یکنواخت‌تر هستند و پارامترهای مکانیک سنگی کمترین تغییرات را نسبت به سایر زون‌ها دارند.
- زون‌های H، G، E، D، و L بیشتر از خوشه‌های یک و سه که مقاوم‌ترین خوشه‌ها هستند تشکیل شده‌اند و دارای مقاومت بالایی می‌باشند. این زون‌ها 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 زونی وجود داشته باشد که میزان تنش در آن زون 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 زون 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 زون‌هایی که توسط موانع تنشی محدود شده‌اند با شماره از یک تا شش نشان داده شده‌اند.

بحث

یکی از کلیدی‌ترین پارامترها در تعیین زون مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی، اندازه تنش افقی مینیمم می‌باشد. اهمیت این پارامتر در مهار رشد عمودی شکافت است، و زون‌هایی حائز اهمیت هستند که میزان تنش در آنها پایین‌تر باشد و توسط زون‌های با تنش بالاتر (موانع تنشی) احاطه شده باشند. به همین منظور شش زون تنشی در پروفیل تنش افقی مینیمم چاه مورد مطالعه شناسایی شده است (شکل ۶). که از میان آنها، زون‌هایی که از لحاظ شرایط مقاومتی سنگ، و مخزنی، وضعیت مناسبی داشته باشند، انتخاب می‌شوند. ترجیح بر این است که این زون‌ها 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.
- زون‌های J، F، C، B و M بیشتر از خوشه‌های دو و شش تشکیل شده‌اند و دارای کمترین مقاومت هستند. این زون‌ها دارای کمترین مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول یانگ و چقرمگی شکست هستند. همچنین این زون‌ها حاوی هیدروکربن می‌باشند.
 - زون‌های F، و J که در دسته زون‌های با کمترین مقاومت هستند، هر کدام توسط دو زون با مقاومت یا تنش بالاتر در بالا و پایین احاطه شده‌اند که زون‌های مقاوم بالا و پایین به‌عنوان یک سد در برابر رشد عمودی شکاف عمل می‌کند.
 - با تقریب به نسبت خوب زون‌های مکانیک سنگی B و C معادل زون تنش‌ی یک، زون F معادل زون تنش‌ی سه، زون مکانیک سنگی J معادل زون تنش‌ی پنج، زون مکانیک سنگی M معادل زون تنش‌ی شش می‌باشند که این زون‌های 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 زون‌ها به ترتیب زون تنش‌ی شش معادل زون مکانیک سنگی M و زون مخزنی I2، زون تنش‌ی سه که کم‌وبیش معادل زون مکانیک سنگی F و زون مخزنی E2 است، زون تنش‌ی (5) که کم‌وبیش معادل زون مکانیک سنگی J و K زون مخزنی G2 است و بخش پایینی زون تنش‌ی یک که معادل زون مکانیک سنگی C و زون مخزنی C3 است مناسب شکافت هیدرولیکی هستند (بخش بالایی زون تنش‌ی یک که معادل زون مکانیک سنگی B و زون 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 ماکسیمم می‌باشند.
 - 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 در شمال غرب کرمان انتخاب شده است. ضخامت بررسی‌شده نهشته‌های کرتاسه در این برش ۳۲۶ متر بوده 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 زیست‌زون استاندارد *Chiastozygus* *litterarius zone*، *Prediscosphaera columnata zone*، *Eiffellithus turriseiffelii zone* و لبه پایینی *Microrhabdulus decoratus zone* تفکیک شد. بر مبنای این زیست‌زون‌ها، 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

واحدهای تکتونیکی آن طی فروانش 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 (آقنابتی، ۱۳۸۴). ایران

فلات ایران از قطعات قاره‌ای متعددی تشکیل شده 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 شده و

* نویسنده مرتبط: m.n.moghaddam@gmail.com/notghi.m@pnu.ac.ir

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).

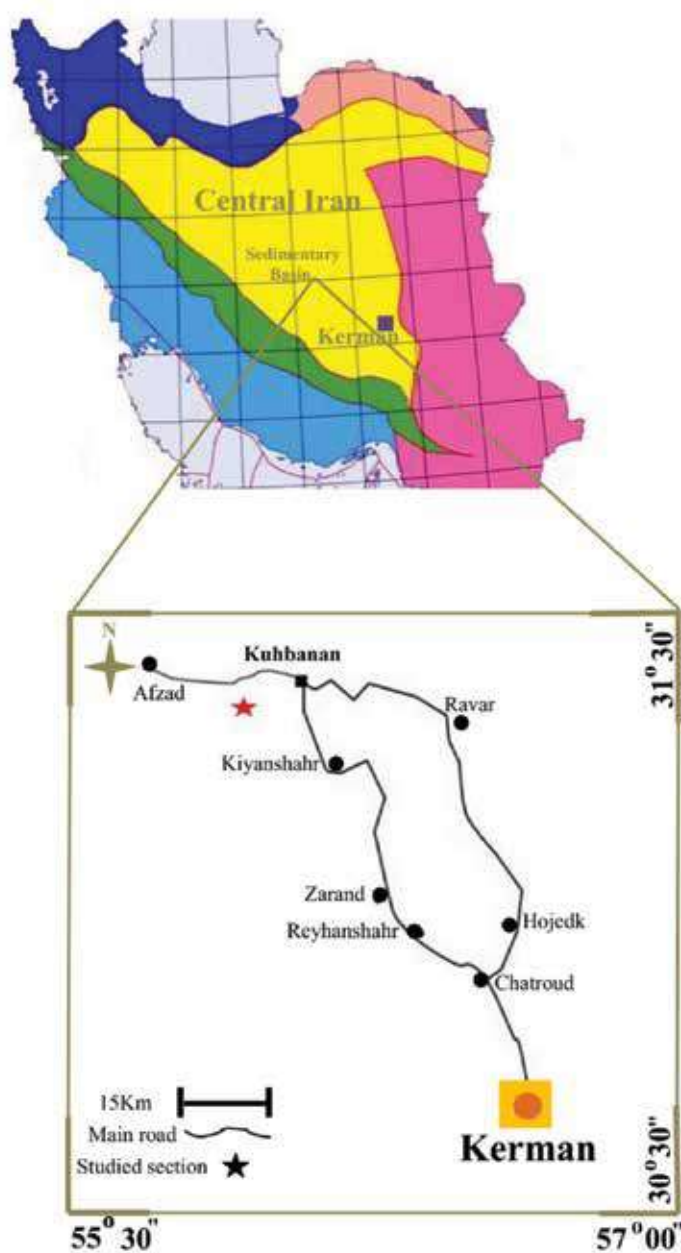
در این حوضه رسوبی نهشته‌های شیلی و مارنی، سنگ‌آهکی، ماسه‌سنگی و کنگلومرایی کرتاسه مشابه با سایر حوضه‌های رسوبی از رخنمون مناسبی برخوردار است ولی به دلیل تاثیر فعالیت‌های تکتونیکی شدید، به صورت مختلف در نواحی جغرافیایی کوتاه نهشته شده و بدون نام‌های رسمی هستند. با این وجود به دلیل ضخامت مناسب لایه‌های 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 دیمیتریچوک (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، زون‌بندی زیستی و تعیین سن نهشته‌ها انجام می‌شود.

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 الپوس 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).

موقعیت برش و چینه‌شناسی

شهرستان کوهبنان در شمال غرب کرمان بخشی از



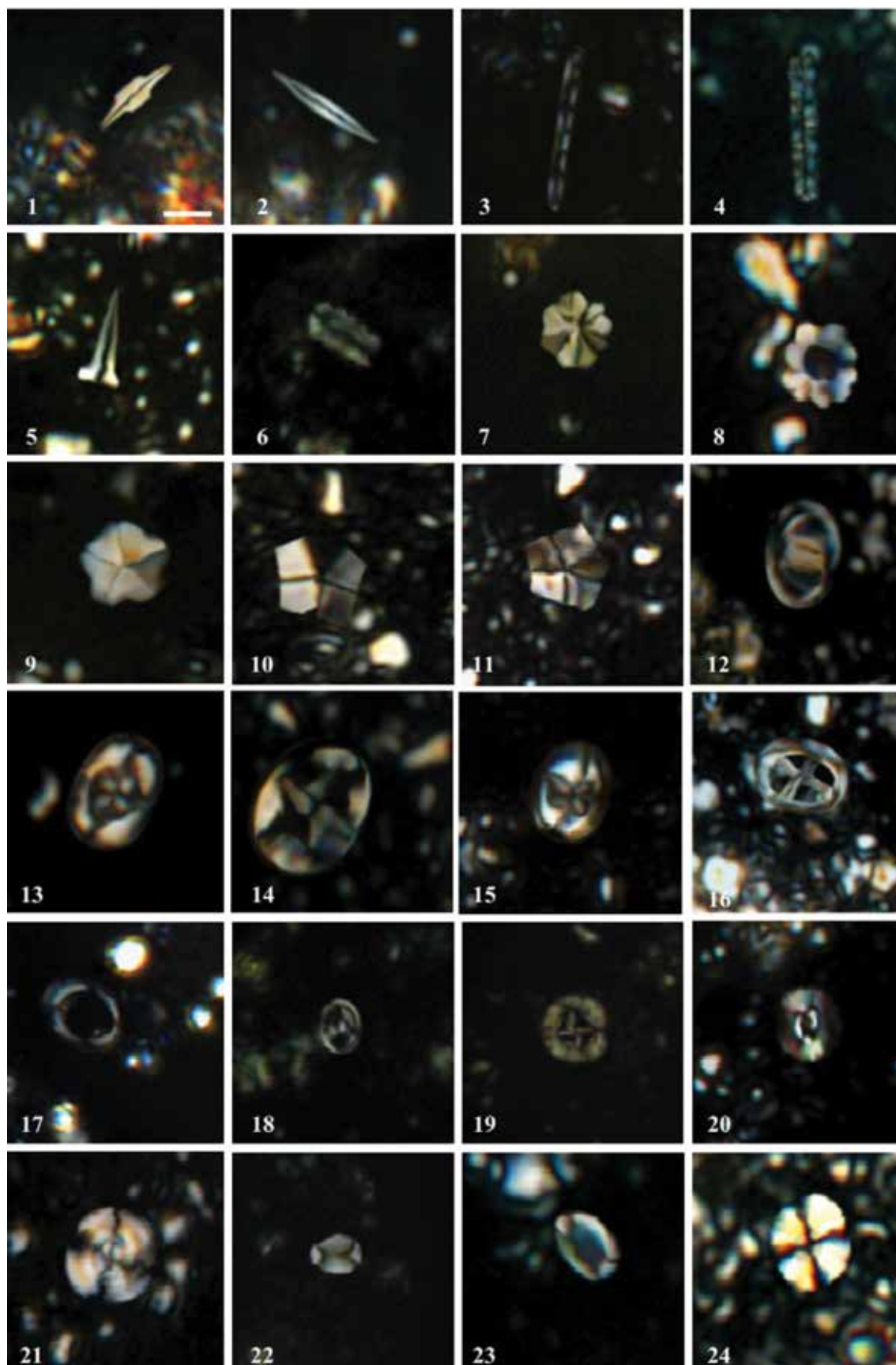
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به برش مورد مطالعه

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

برخورداری 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



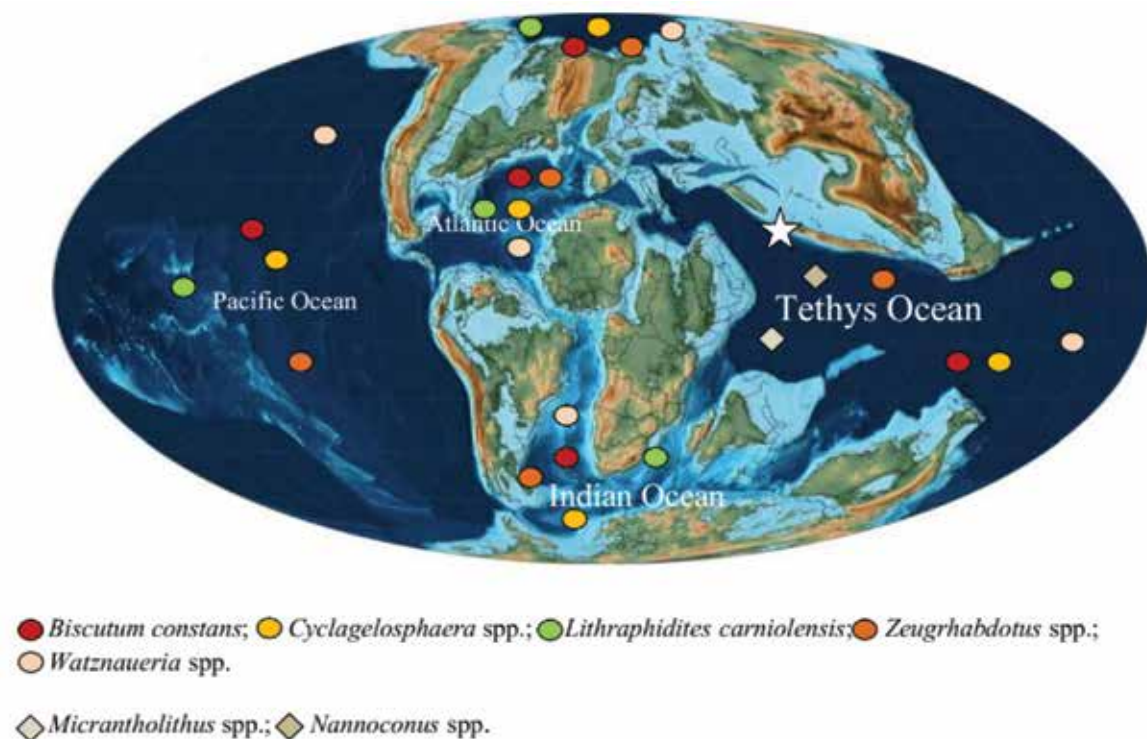
پلیت ۱. تصاویر نانوفسیل‌های آهکی شناسایی‌شده در برش کوهبنان (Scale bar: 5 μ m)

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.، *carniolensis* 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. انواعی 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

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 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

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

معادل با NC6 و NC7

زیست زون *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 زون CC7 با آخرین ظهور *Micrantholithus hoschulzii* به دو زیرزون CC7a و CC7b بخش می‌شود. مطابق مطالعات تیرستاین (Thierstein, 1976)، اولین ظهور *Eprolithus floralis* در

آپتین پیشین و در محدوده این زیست زون رخ داده است.

زیست زون مذکور معادل با زیست زون NC6 (از اولین ظهور *Hayesites irregularis* تا اولین ظهور *Eprolithus floralis*) و NC7 (از اولین ظهور *Eprolithus floralis* تا اولین ظهور *Prediscosphaera columnata*) از زون بندی 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 زون 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 زون NC7 است.

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

معادل با NC8 و NC9

زیست زون *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.

زیست‌چینه نگاری و تعیین سن

نانوفسیل‌های آهکی به علت دارا بودن تنوع زیاد، قدرت تفکیک بالا و گسترش جهانی یکی از بهترین گروه‌های فسیلی جهت انجام مطالعات زیست‌چینه نگاری به ویژه در بازه زمانی کرتاسه هستند. با توجه به فراوانی نانوفسیل‌ها در برش مورد مطالعه از این گروه فسیلی برای زون بندی زیستی استفاده شده است. شایان ذکر است زیست‌چینه 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 زون بندی زیستی نهشته‌های کرتاسه در برش مورد مطالعه از زون بندی سیسینگ (Sissingh, 1977) با علامت اختصاری CC اصلاح شده توسط پرچ نیلسون (Perch-Nielsen, 1985) استفاده شده و با زیست‌زون‌های 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 زیست‌زون جدا شد (شکل ۳) که با زیست‌زون‌های استاندارد جهانی مطابقت داده شد. در ادامه شرح زیست‌زون‌های تعیین شده، ارائه می‌شود.

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

در برش کوهبنان این زیست‌زون بعد از زیست‌زون 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 زیست‌زون NC10 میسر نبود.

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

زیست‌زون *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 زیست‌زون سنومانین پسین است.

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

در این مطالعه بخش پایینی زیست‌زون 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 زون امکان‌پذیر نشد. علاوه بر آن گونه‌های شاخص زیست‌زون‌های NC11 و NC12 مشاهده نشد و تعیین زیست‌زون‌های 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.

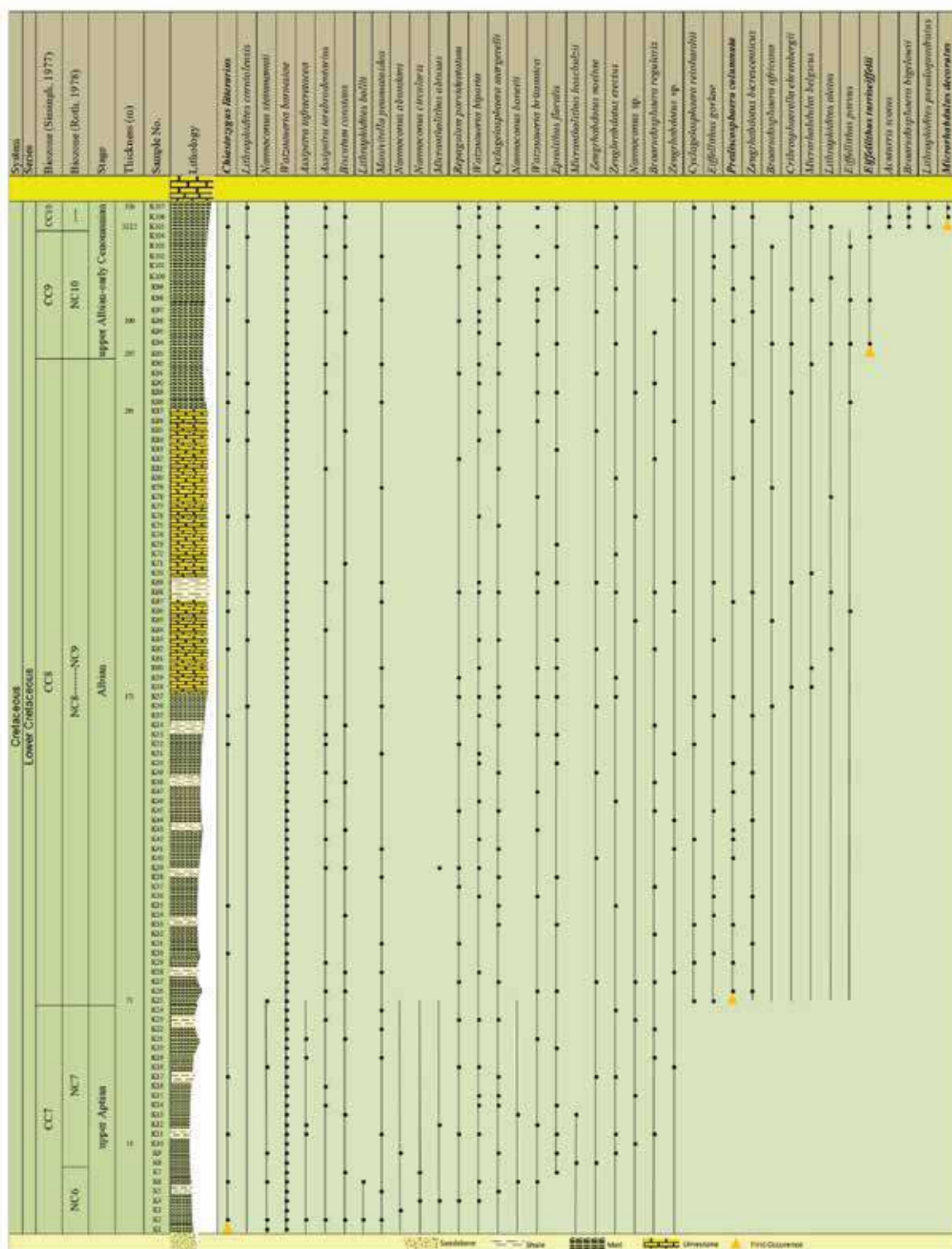
ظهور *Prediscosphaera columnata* تا اولین ظهور *Eiffellithus turriseiffelii* معرفی شده است. پرچ نیلسون (Perch-Nielsen, 1985) زیست‌زون CC8 را با توجه به اولین ظهور گونه‌های *Tranolithus phacelosus* و *Corolition signum* به بخش‌های فرعی جدا کرده است. زیست‌زون CC8 معادل با زیست‌زون NC8 (از اولین ظهور *Prediscosphaera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

محدوده زیست‌زون 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 زون 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 زیست‌زون مذکور میسر نشد.

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

زیست‌زون *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 زیست‌زون آلبین پسین و سنومانین پیشین می‌باشد.

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



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

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 زیست‌زون 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 زیست‌زون‌ها، 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

- 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. ۲۰/۱۰۰۱/۱۷/۳۵۷۱۲۸/۱۳۹۸/۱۳/۵۰/۱/۵
- 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)، ۲۰/۱۰۰۱/۱۷۳۵۷۱۲۸/۱۴۰۰/۱۵/۵۸/۴/۸. ۴۹-۴۱
- 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. ۱۰/۲۲۰۵۵/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. ۲۰/۱۰۰۱/۱۷۳۵۷۱۲۸/۱۴۰۱/۱۶/۶۱/۳/۰
- وزیری، م.، داستانی‌پور، 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
- آق‌انباتی، ع.، ۱۳۸۴. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶.
- احمدی، ط.، وزیری، م.ر. و داستانی‌پور، 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. ۱۰/۲۲۰۶۷/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.

- Historical, Social and Physical Approach. Developments 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 Geologisches 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 Fucoid 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 Wesern North Atlantic (Site 534): Biostratigraphy, Preservation, and some observations on biogeography and paleoceanography. In: Sheridan, R.E., Gradstein, F.M., et al. (eds.), Initial report 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 cre-

taceous 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.