



فصلنامه زمین ساخت

زمستان ۱۴۰۲، سال هفتم، شماره ۲۸

doi 10.22077/jt.2025.8824.1198

مقاله پژوهشی

کاربرد مدل سازی فرکتالی و سه بُعدی در اکتشاف مواد معدنی؛ مطالعه موردی گله چاه، شرق ایران

هادی علی نیا^{۱*}، محمد مهدی خطیب^۲، محمد حسین زرین کوب^۳، مجید کوهستانیان^۴

۱- دکتری تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران؛ مدیر گروه معدنی، شرکت اطلس افروز شرق، مشهد، ایران

۲- استاد تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- استاد تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۴- کارشناس ارشد پترولوژی، گروه اکتشاف معدنی، شرکت اطلس افروز شرق، مشهد، ایران

چکیده:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

محدوده مورد مطالعه در حدود ۱۳۵ کیلومتری شمال باختری بیرجند و ۴۷ کیلومتری جنوب باختری سرایان، در استان خراسان جنوبی واقع شده است. به منظور اکتشاف مواد معدنی و تعیین حجم فضاهای خالی، از مدل سازی فرکتالی و مدل سازی سه بُعدی استفاده شد. در مدل سازی فرکتالی، محدوده مورد مطالعه در یک شبکه ۱۶ سلولی قرار داده شد و بعد از برداشت عناصر ساختاری، با استفاده از روش شمارش جعبه ای، بُعد فرکتالی تعیین شد. این مدل سازی حاکی از آن است که بیشترین بُعد فرکتالی با مقدار $1/7313$ در قسمت باختری منطقه قرار دارد؛ این وضعیت احتمالاً نشان از توده های نفوذی در اعماق دارد. با توجه به نتایج حاصل از بررسی اولین مرحله تنش در زمان ژوراسیک در راستای شمال خاوری- جنوب باختری، مدل سازی سه بُعدی گسل ها و رگه های معدنی تا عمق ۳۰۰ متر انجام شد و حجم فضاهای باز حاصل از شکستگی ها و حجم فضاهای باز پُر شده با محلول های کانه دار به دست آمد. نتایج این مدل سازی نشان می دهد که حجم فضاهای باز پُر شده با محلول کانه دار تا عمق ۳۰۰ متر برابر با ۱۹۴،۹۵۱ متر مکعب است؛ به بیان دیگر ۰/۱۱ درصد از کل فضاهای باز، با محلول های کانه دار پُر شده است. به این ترتیب با در نظر گرفتن وزن مخصوص سنگ های میزبان (۳/۲۵ گرم بر سانتی متر مکعب)، ذخیره ای برابر با حدود ۶۰۰ هزار تن به دست می آید که با ذخیره تعیین شده از روش های اکتشافی دیگر (حدود ۵۱۳،۷۷۰ تن)، تطابق خوبی دارد. لذا این روش می تواند به عنوان ابزاری کم هزینه برای اکتشاف و تعیین ذخیره احتمالی مواد معدنی استفاده شود.

کلید واژه ها: مدل سازی فرکتالی، مدل سازی سه بُعدی، فضاهای باز، گله چاه، خاور ایران.

*ایمیل: alinia.hadi.62@gmail.com

تلفن تماس: ۰۹۱۵۹۱۶۶۶۱۲



Research Paper

Application of fractal and 3D modeling in mineral exploration; a case study of Galle Chah, East of Iran

Hadi Alinia^{*1}, Mohammad Mahdi Khatib², Mohammad Hossein Zarrinkoub³, Majid Kouhestanian⁴

1- PhD., Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran; Head of Mining Department, Atlas Afrooz Shargh Company, Mashhad, Iran

2- Professor of Tectonics, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

3- Professor of Tectonics, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

4- MSc in Petrology, Senior Expert in Mineral Exploration, Atlas Afrooz Shargh Company, Mashhad, Iran

Abstract

The study area is located about 135 km northwest of Birjand and 47 km southwest of Sarayan, in South Khorasan Province. In order to explore mineral deposits and to determine the volume of open spaces and the volume of open spaces filled with mineralizing solutions, fractal modeling and 3D modeling were used. In fractal modeling, the study area was placed in a 16-cell grid and after mapping the structural elements, the fractal dimension was determined using the box counting method. This modeling indicates that the highest fractal dimension with a value of 1.7313 is located in the western part and then with a value of 1.686 in the southern part of the region; this situation probably indicates the presence of intrusive bodies at depth. According to the results of the first stage of stress investigation in the Jurassic period in the northeast-southwest direction, 3D modeling of the faults and mineral veins was carried out up to a depth of 300 meters, and the volume of open spaces resulting from fractures and the volume of open spaces filled with mineralizing solutions were obtained. The results of this modeling show that the volume of open spaces filled with mineralizing solutions up to a depth of 300 meters is 194,951 cubic meters; in other words, 0.11 percent of the total open spaces are filled with mineralizing solutions. Considering the specific gravity of the host rocks and the volume of open spaces filled with mineralizing solutions, a reserve of about 600 thousand tons is obtained, which is in good agreement with the reserve determined from other exploration methods (about 513,770 tons). Therefore, this method can be used as a low-cost tool for exploring and determining potential mineral reserves.

Key words: fractal modeling, 3D modeling, open spaces, Galle Chah, eastern Iran.

*Email: alinia.hadi.62@gmail.com

Tel: +989159166612

مقدمه

اکتشافات معدنی در سال‌های اخیر منجر به شناسایی ذخایر معدنی ارزشمندی در ایران شده است؛ اما روش‌های سنتی اکتشاف و ارزیابی ذخایر، معمولاً زمان‌بر و پرهزینه هستند. از این رو، توسعه روش‌های نوین برای اکتشاف عمیق‌تر ذخایر معدنی از اهمیت بالایی برخوردار است. مطالعات نظری و عددی نشان می‌دهد که سیستم‌های کانه‌زایی از پیچیدگی‌های زیادی برخوردارند (Liu et al., 2016). همچنین مطالعات مختلف نشان می‌دهد ساختارهای زمین‌شناسی، به‌ویژه گسل‌ها و پهنه‌های بُرشی، نقش کلیدی در کنترل کانی‌سازی هیدروترمال دارند (انصاری جعفری و همکاران، ۱۳۹۴؛ غلام زاده و همکاران، Sun؛ Wilson et al, 2016؛ Mohebi et al, 2015؛ ۱۳۹۴؛ et al, 2018؛ Chauvet, 2019؛ Blenkinsop et al, 2020). این پهنه‌ها به‌عنوان مسیرهای اصلی انتقال سیالات هیدروترمال عمل کرده و با ایجاد فضاهای مناسب (مانند شکستگی‌های ثانویه و مناطق بُرشی)، شرایط مطلوبی برای تمرکز و ته‌نشست مواد معدنی فراهم می‌کنند. پژوهشگران با استفاده از تحلیل‌های ساختاری و مدل‌سازی ژئومتری، ارتباط مستقیمی بین هندسه پهنه‌های بُرشی و الگوی توزیع کانی‌سازی تا اعماق متوسط (حدود ۳۰۰ متر) شناسایی کرده و بر اهمیت پهنه‌های بُرشی به‌عنوان شاخص‌های اکتشافی در مناطق مشابه تأکید دارند (Fabricio et al., 2018). با توجه به اینکه، انجام عملیات اکتشافی و برآورد ذخایر معدنی بر اساس مطالعات صحرایی، هزینه‌های قابل توجهی را تحمیل می‌کند، به‌کارگیری روش‌های نرم‌افزاری برای تسریع فرآیند اکتشاف و کاهش هزینه‌ها ضروری است.

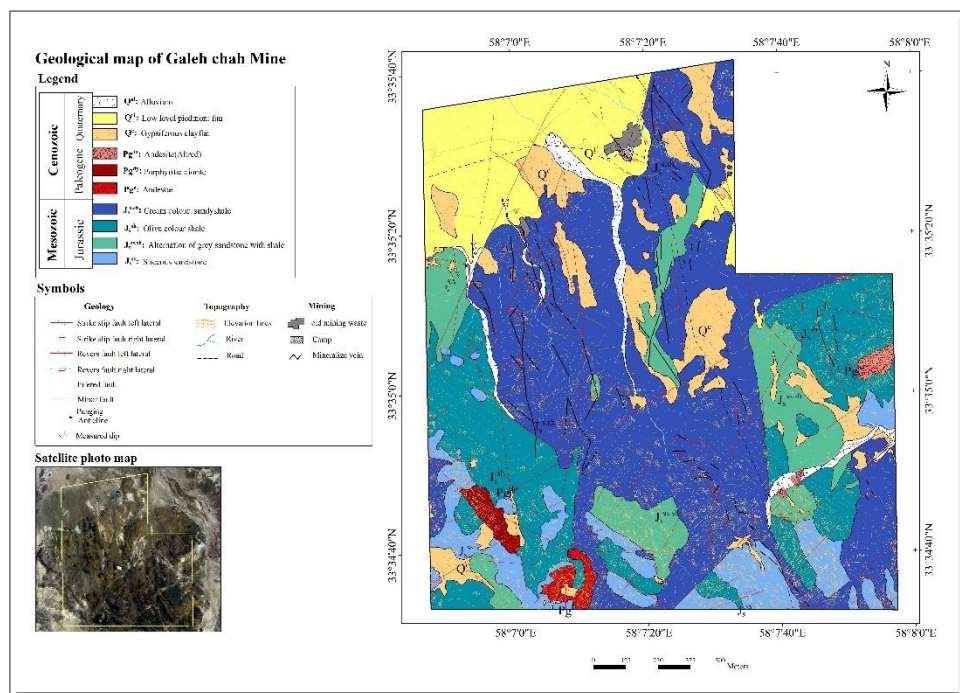
از جمله این روش‌ها می‌توان به مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی در مطالعات زمین‌شناسی، اکتشاف و ارزیابی کمی منابع معدنی اشاره کرد (عبداللهی شریف و همکاران، ۱۳۸۹؛ Meng et al. 2022؛ Liu et al. 2023؛ Mao et al. 2020؛ Li et al. 2015؛ Wang et al. 2012؛ Zanchi et al. 2007؛ Kemp, 2007). برای ساخت مدل زمین‌شناسی سه‌بعدی، از داده‌هایی مانند نقشه‌های زمین‌شناسی، گمانه‌ها و ترانشه‌ها استفاده می‌شود. در ساخت مدل سه‌بعدی برای توده معدنی، غالباً

درون‌یابی به‌کار گرفته می‌شود. برای مثال، می‌توان الگوریتم‌های IDW و کریجینگ معمولی (OK) را به‌کار برد (Daya, 2012).

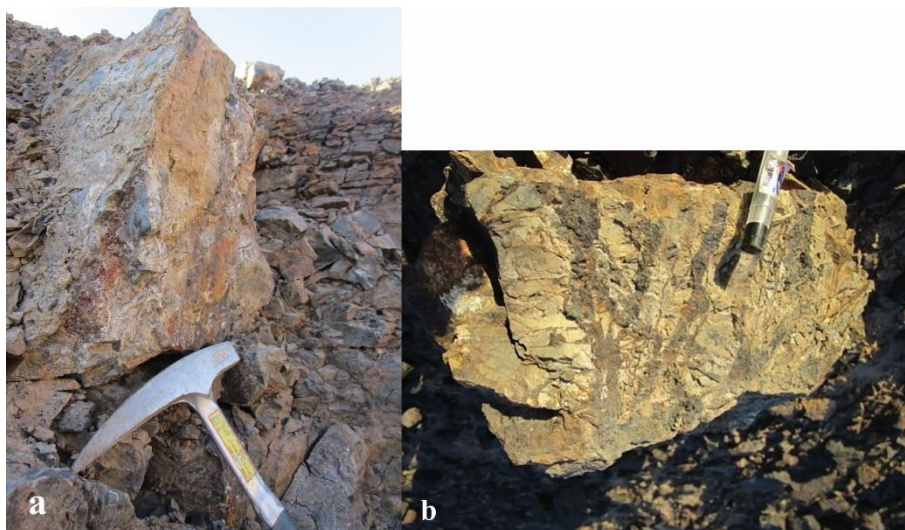
در این پژوهش، از روش‌های مدل‌سازی فرکتالی و سه‌بعدی برای بررسی الگوی گسترش کانی‌سازی تا عمق ۳۰۰ متری استفاده شده است. این عمق بر اساس مطالعات ژئوفیزیکی (شامل داده‌های مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی) انجام شده توسط Karimpour و همکاران (۲۰۱۱) که نشان می‌دهد ساختارهای پهنه‌های بُرشی در پهنه لوت تا اعماق بیش از ۳۰۰ متر تداوم دارند انتخاب شده است. این یافته‌ها مؤید آن است که عمق ۳۰۰ متری برای مطالعه الگوهای کانی‌سازی در منطقه، عمقی مناسب و قابل اعتماد است.

موقعیت و زمین‌شناسی محدوده

محدوده معدنی گله چاه در فاصله ۱۳۵ کیلومتری شمال غرب بیرجند و ۴۷ کیلومتری جنوب غرب سرایان در استان خراسان جنوبی واقع شده است. این منطقه بین عرض‌های جغرافیایی ۳۰' ۳۳° تا ۳۴° شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۸° تا ۳۰' ۵۸° شرقی در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی آیسک (نادری میغان و اکرمی، ۱۳۷۹) قرار دارد (شکل ۱). از دیدگاه زمین‌ساختی، این محدوده بخشی از پهنه لوت محسوب می‌شود که در مجاورت گسل نایبند واقع شده است (Alavi, 1991). مرزهای این پهنه شامل گسل درونه در شمال، پهنه زمین‌درز سیستان و گسل نه‌بندان در شرق، گسل نایبند در غرب و کمپلکس آتشفشانی بزمان و فرونشست جازموریان در جنوب است (Karimpour et al., 2011). دو سیستم گسلی اصلی منطقه شامل گسل‌های امتدادلغز راستگرد نه‌بندان (در شرق) و نایبند (در غرب) به همراه شاخه‌های فرعی آنها، ساختارهای تکتونیکی مهم منطقه را تشکیل می‌دهند که به صورت پهنه‌های بُرشی متعدد در منطقه ظاهر شده‌اند (خطیب و همکاران، ۱۳۹۸). محدوده معدنی گله چاه نیز به عنوان یک پهنه بُرشی کوچک شناخته می‌شود که کانی‌سازی در امتداد برخی از شکستگی‌های آن قابل مشاهده است (شکل ۲).



شکل ۱. نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ (اقتباس از خطیب، ۱۳۹۹ با اندکی تغییرات).



شکل ۲. کانی سازی سرب و روی در محدوده معدنی گله چاه.

ارتباط با آنها تشکیل شده است (علی نیا و همکاران، ۱۴۰۱).

واحدهای سنگی منطقه به دو گروه اصلی تقسیم می شوند. ۱) سنگ های رسوبی مزوزوئیک شامل تناوبی از شیل، سیلتستون، مارن و ماسه سنگ با لایه بندی مشخص مربوط به دوره ژوراسیک. ۲) سنگ های آذرین ترشیری شامل مجموعه ای از سنگ های کالکوالکالن مانند کوارتز لایت پورفیری، داسیت و ریوداسیت پورفیری، هورنبلند- بیوتیت

پهنه های بُرشی به دلیل ماهیت ضعیف ساختاری خود، نقش مهمی در هدایت سیالات کانه دار و تشکیل ذخایر معدنی ایفا می کنند (علی نیا و همکاران، ۱۴۰۲؛ علی نیا و همکاران، ۱۴۰۱؛ Kavyani-Sadr et al., 2022; Cheng et al., 2019; Fabricio et al., 2018; Aliyari et al., 2007). مطالعات انجام شده حاکی از آن است که این پهنه ها در منطقه بین گسل های نهبندان و نایبند به صورت ساختارهای متنوعی از جمله شکستگی های ریدل ظاهر شده اند و کانی سازی های متعددی در



(به طول ۸/۷ و عرض ۶/۷ کیلومتر)، با ایجاد فضاهای خالی، شرایط را برای نفوذ توده‌های نیمه‌عمیق و آتشفشانی فراهم کرده است. این فرآیند منجر به تشکیل پهنه فرعی گله‌چاه (F2) با راستای شمال غرب-جنوب شرق (به طول ۷ و عرض ۱/۸ کیلومتر) شده است که با پهنه اصلی زاویه ۴۵ درجه می‌سازد (شکل ۳). این ساختارها از طریق ایجاد شکستگی‌ها و چرخش بلوک‌های گسلی، فضاهای مناسبی برای تمرکز کانی‌سازی ایجاد کرده‌اند.

بررسی‌های انجام شده، وجود سه سیستم گسلی متمایز را در منطقه محرز کرده است (شکل ۴). (۱) گسل‌های شمالی-جنوبی با مکانیسم امتدادلغز راست‌بر و کانی‌سازی محدود. (۲) گسل‌های شمال غرب-جنوب شرق با مکانیسم امتدادلغز راست‌بر و مؤلفه معکوس که میزبان اصلی کانی‌سازی سرب و روی هستند. (۳) گسل‌های شمال شرق-جنوب غرب با مکانیسم امتدادلغز چپ‌بر و فاقد کانی‌سازی قابل توجه.

الگوی توزیع رگه‌های معدنی به‌وضوح نشان‌دهنده کنترل ساختاری است، به‌طوری‌که در بخش شرقی با شیب متوسط ۵۱ درجه و در بخش غربی با شیب ۶۵ درجه (هر دو به سمت شمال شرق) قرار گرفته‌اند. این روابط ساختاری-معدنی اهمیت پهنه‌های گسلی را در هدایت سیالات کانه‌دار نشان می‌دهد.

تکامل ساختاری منطقه در دو مرحله رخ داده است (علی نیا و همکاران، ۱۴۰۱) (شکل ۵). مرحله اول مربوط به تنش در زمان ژوراسیک با جهت شمال شرق-جنوب غرب است. در این مرحله، محورهای اصلی تنش به ترتیب $\sigma_1 = 215/03$ ، $\sigma_2 = 116/73$ و $\sigma_3 = 306/17$ بوده که منجر به ایجاد پهنه بُرشی راستگرد شمالی-جنوبی (F1) و شکستگی‌های همراه آن شده است. ضریب بُرشی این پهنه نسبت به محور σ_1 ، $0/26$ اندازه‌گیری شده است. همچنین، این تنش باعث تشکیل چین خوردگی‌هایی با راستای محوری شمال غربی-جنوب شرقی شده است.

مرحله دوم مربوط به تنش در زمان پالئوژن با جهت شمال غربی-جنوب شرقی است. در این مرحله، محورهای اصلی تنش به ترتیب $\sigma_1 = 156/15617$ ، $\sigma_2 = 10/70$ و $\sigma_3 = 249/11$ بوده که موجب ایجاد پهنه بُرشی راستگرد گله‌چاه (F2) با راستای شمال غربی-

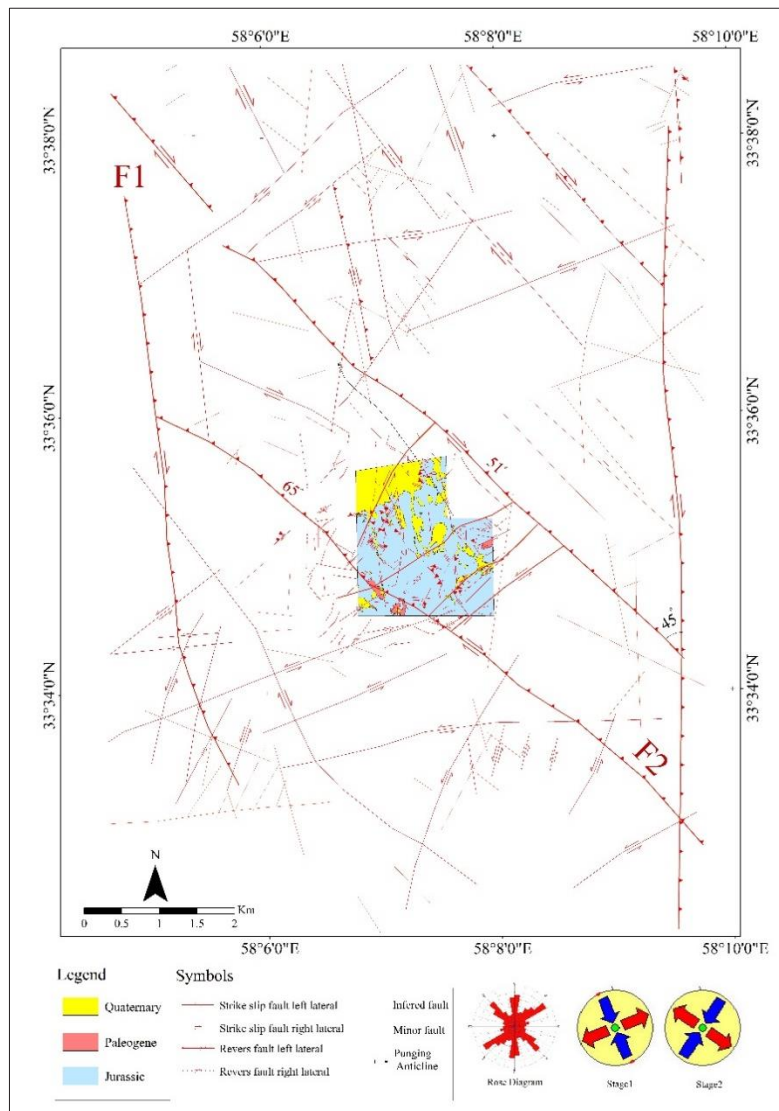
آندزیت و میکرودیوریت که به درون واحدهای رسوبی ژوراسیک نفوذ کرده‌اند (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۰).

روش مطالعه

در مطالعات نوین زمین‌شناسی، بررسی‌های آماری شکستگی‌ها با تلفیق برداشت‌های صحرایی و پردازش داده‌های سنجش از دور انجام می‌شود تا ضمن صرفه‌جویی در زمان و هزینه، دقت تحلیل‌ها افزایش یابد (علی نیا و همکاران، ۱۴۰۲؛ علی نیا و همکاران، ۱۴۰۱؛ غلامزاده و همکاران، ۱۳۹۴؛ Ahmadi et al., 2021). منطقه گله‌چاه به دلیل ویژگی‌های منحصربفرد از جمله ساختار گسلی واضح در تصاویر ماهواره‌ای، پوشش آبرفتی محدود و پتانسیل معدنی بالا برای این مطالعه انتخاب شد. در این پژوهش، ابتدا داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ (با تفکیک ۱۵ متر) و آستر مورد پردازش و تفسیر قرار گرفت (علی نیا و همکاران، ۱۴۰۱). سپس منطقه به شبکه‌ای ۱۶ سلولی (هر سلول $0/25$ کیلومترمربع) تقسیم‌بندی شد تا تحلیل ساختاری دقیق‌تری انجام پذیرد. با توجه به تأثیر فرآیندهای تکتونیکی و دگرسانی در منطقه، سازوکار حرکتی گسل‌ها با استفاده از شواهد صحرایی (آثار لغزش و جابجایی واحدها) تعیین گردید. پس از پایان مطالعات صحرایی، نقشه ساختاری گسل‌ها همراه با رخنمون رگه‌های معدنی منطقه تهیه شد و دیاگرام گل سرخی شکستگی‌ها و رگه‌های کانی‌سازی ترسیم گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار Win-Tensor، راستای تنش اصلی (۱۵) برای هر شبکه ساختاری محاسبه و سازوکار کانونی حاصل از کینماتیک گسل‌ها در هر ایستگاه برداشت، بر روی نقشه ساختاری ترسیم شد. این تحلیل‌ها منجر به بازسازی الگوی تنش دیرین منطقه گردید و امکان بررسی روندهای ساختاری مؤثر در کانی‌سازی را فراهم آورد. در نهایت با کمک نرم‌افزارهای Move2016.1 و Geosoft، مدل‌سازی سه بُعدی تا عمق ۳۰۰ متری انجام شد.

بحث و بررسی

مطالعات ساختاری در منطقه معدنی گله‌چاه نشان‌دهنده تأثیر دو سیستم اصلی گسلش با راستاهای N02 و N330 است. پهنه بُرشی اصلی (F1) با راستای شمالی-جنوبی



شکل ۳. نقشه ساختاری محدوده گله چاه که وجود دو پهنه بُرش راستگرد را نشان می دهد.

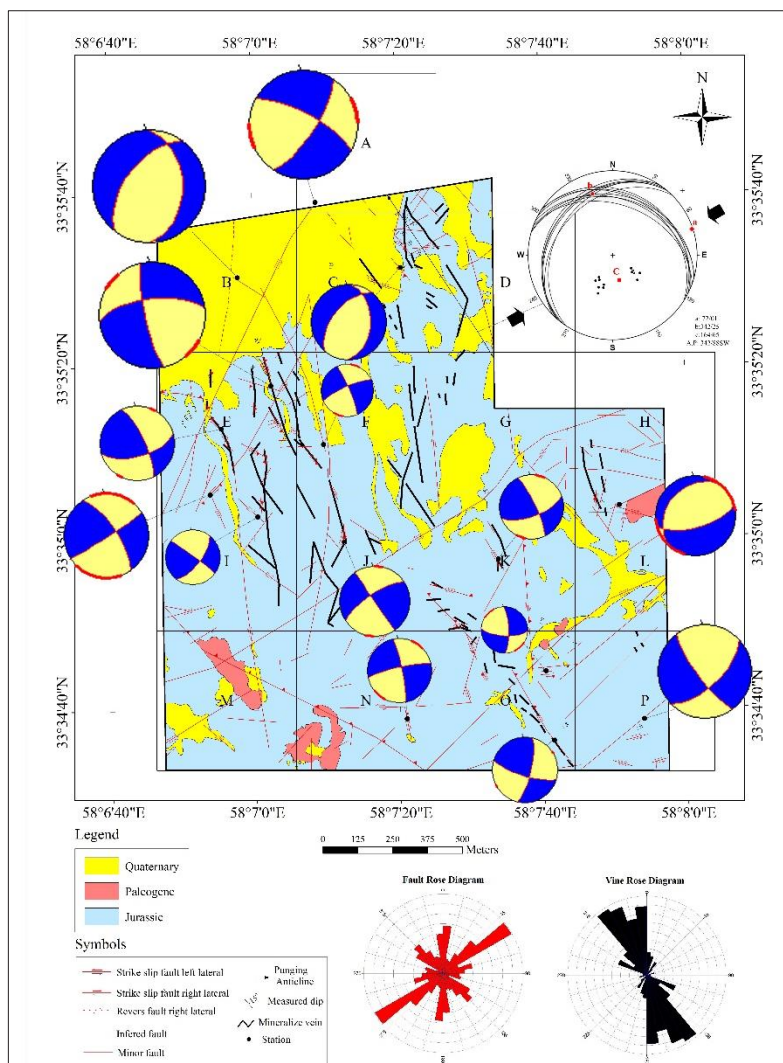
گسل ها از طریق محاسبه پارامترهای طول گسل ها (a)، تعداد تقاطع ها (b) و تعداد گسل ها (c) در هر سلول و اعمال رابطه $pf = (a/A) + (b/B) + (c/C)$ تعیین شد (شکل ۶). نتایج این روش نشان داد مناطق دارای تنش بیشینه، از تراکم گسلی و گرنش حجمی بیشتری برخوردارند. تحلیل همپوشانی داده ها نشان دهنده تمرکز قابل توجه کانی سازی در بخش های شمال غربی منطقه، به ویژه در محل تلاقی گسل های دارای روند شمال غربی- جنوب شرقی است. سلول های C، E، L و O به عنوان مناطقی با بیشترین تراکم شکستگی ها شناسایی شدند که احتمالاً با توده های نیمه نفوذی (میکرو دیوریت و داسیت- ریوداسیت) در ارتباط هستند.

در گام بعدی، از روش «شمارش جعبه ای» برای مدل سازی فرکتالی شکستگی ها استفاده شد (شکل

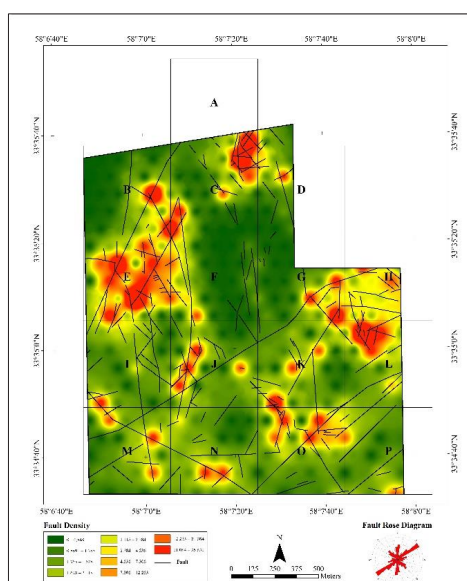
جنوب شرقی و شکستگی های همراه آن شده است. ضریب بُرش این پهنه نسبت به محور ۱۵، ۱۹/۰ اندازه گیری شده است.

مدل سازی دو بعدی رگه های معدنی

با توجه به هزینه های بالای عملیات اکتشافی، محققین مختلف تلاش کرده اند تا روش هایی کم هزینه تر و آسان تر برای اکتشاف مواد معدنی ابداع کنند. مدل سازی فرکتالی (دو بُعدی) و مدل سازی سه بُعدی نمونه هایی از این روش ها به شمار می روند. مطالعه حاضر با تلفیق روش های تحلیل گسل ها و مدل سازی فرکتالی، به بررسی ارتباط بین ساختارهای زمین شناسی و کانی سازی در منطقه پرداخته است. در مرحله اول، با استفاده از روش هاردکستل در نرم افزار ArcGIS، تراکم

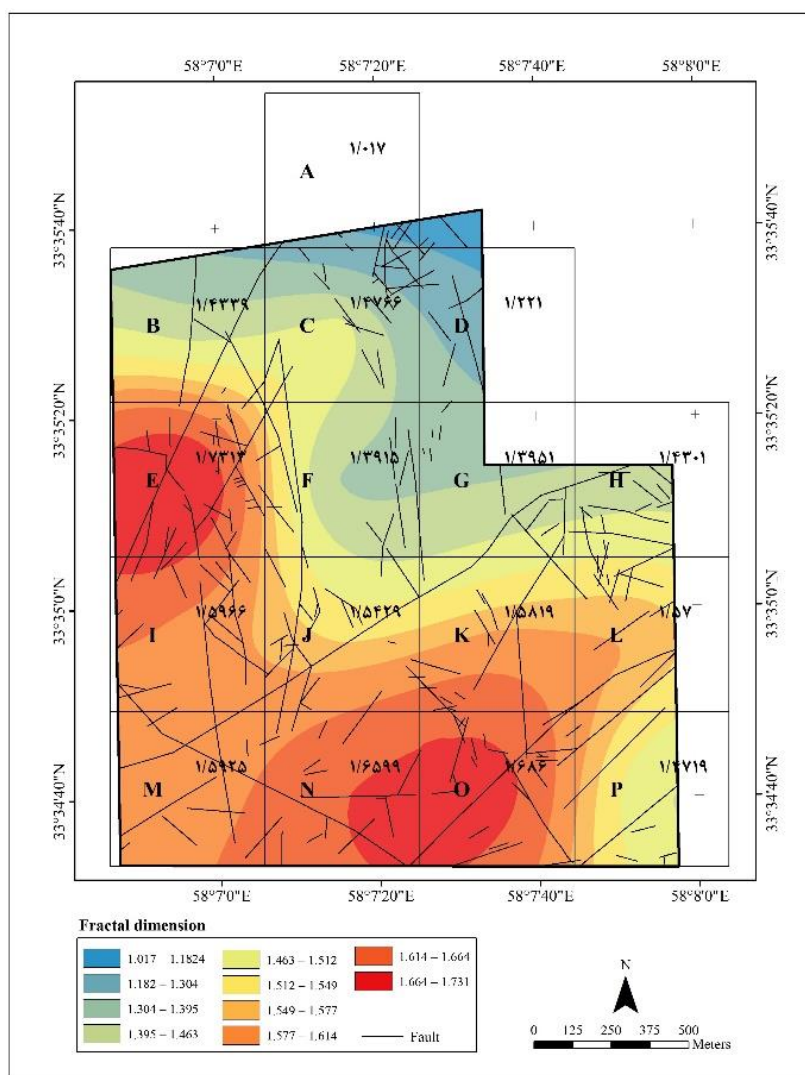


شکل ۴. نقشه ساختاری منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت رگه‌ها و سیکلوگراف آن‌ها در ایستگاه‌های برداشت شده. نمودار گل سرخی قرمز مربوط به گسل‌ها و نمودار گل سرخی سیاه مربوط به رگه‌های کانی‌سازی در منطقه است.



احتمالاً نشان دهنده وجود توده های نفوذی در عمق می باشد. این یافته ها با این واقعیت که مقادیر بالای بُعد فرکتالی نشانگر بلوغ زمین ساختی کمتر و پویایی ساختاری بیشتر هستند، کاملاً سازگار است و می تواند راهنمای مناسبی برای اکتشافات معدنی در منطقه باشد.

از آن است که مناطق دارای بُعد فرکتالی بالا، روند شمال غربی - جنوب شرقی دارند که با الگوی تراکم رگه های کانی سازی در منطقه، به ویژه در سلول های O و E، همخوانی کامل دارد. نکته جالب توجه، مشاهده بیشترین مقدار بُعد فرکتالی در بخش غربی منطقه است که علیرغم نبود رخنمون توده های نفوذی در سطح،

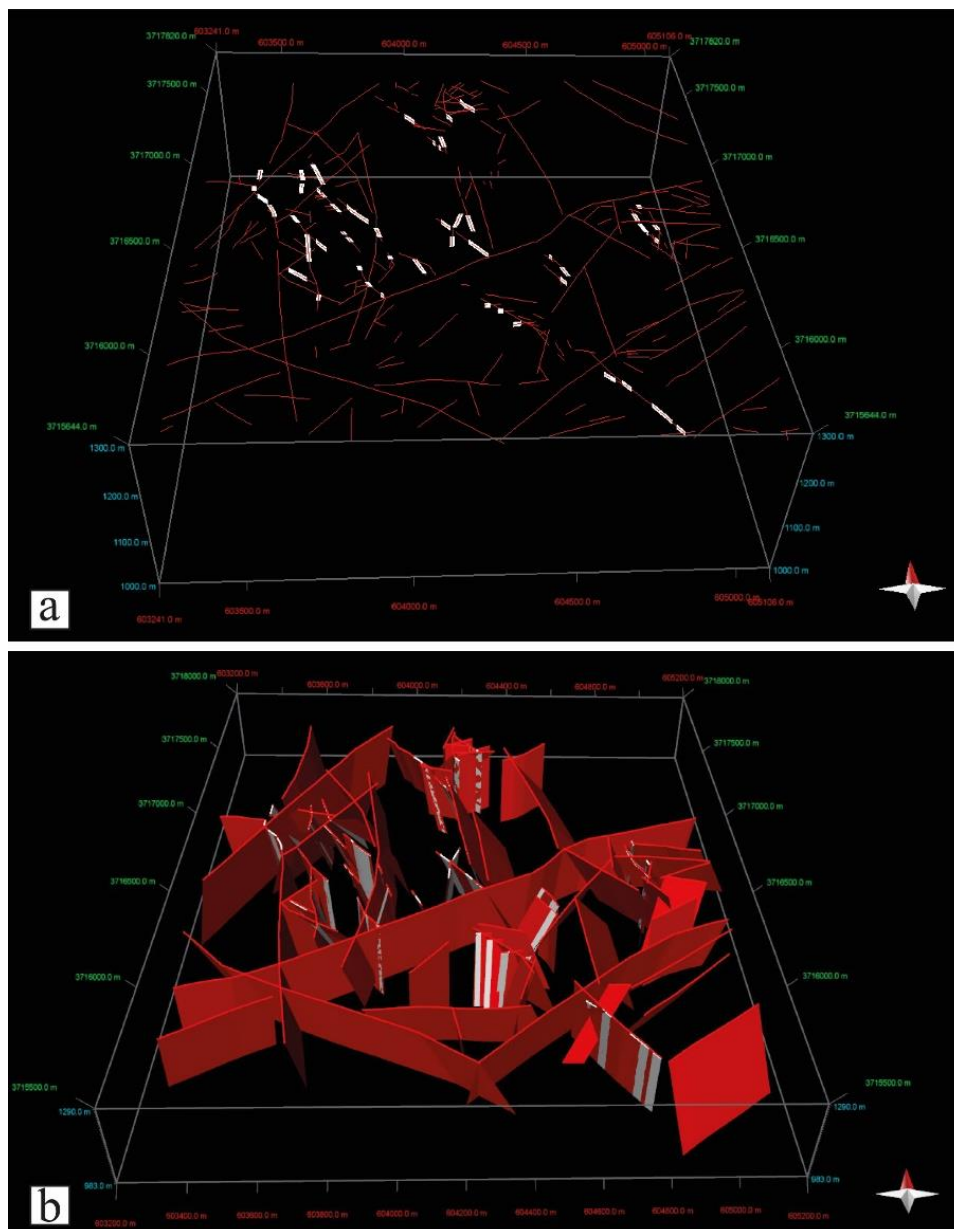


شکل ۷. نقشه فرکتال شکستگی های محدوده معدنی گله چاه.

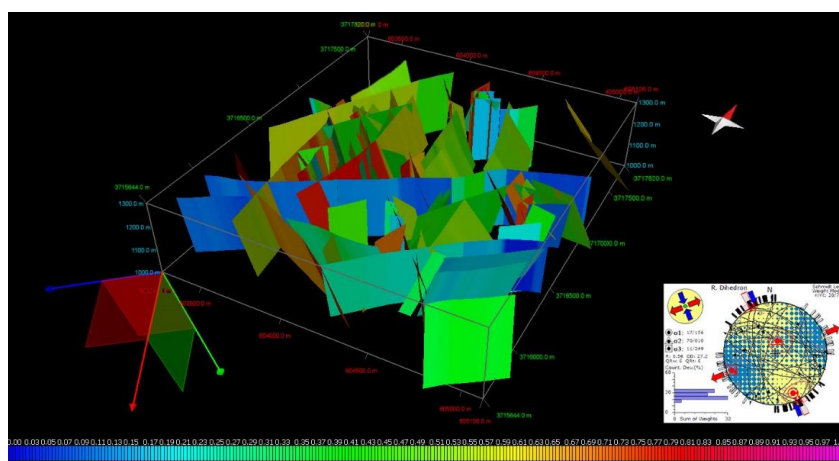
باشد، احتمال فعالیت گسل و تشکیل فضاهای خالی بیشتر است (شکل ۹).

مدل سازی سه بُعدی گسل ها و رگه های کانی سازی

براساس برداشت های ساختاری در محدوده معدنی گله چاه، با استفاده از نرم افزارهای Move 2016.1 و Geosoft، مدل سازی گسل ها و رگه ها تا عمق ۳۰۰ متر انجام شد (شکل ۸). با اعمال کردن تنش های اصلی منطقه، مناطق مستعد لغزش (Slip Tendency) محاسبه گردید که مقادیر آن بین ۰ تا ۱ متغیر است؛ هرچه این مقدار به ۱ نزدیک تر



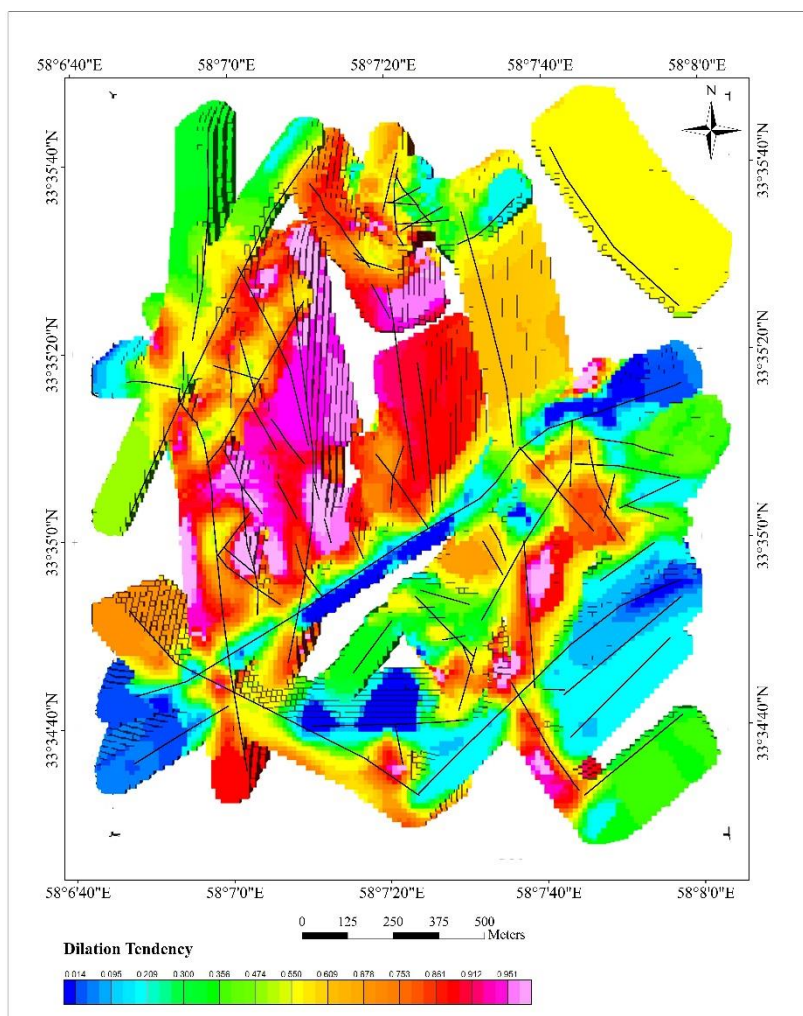
شکل ۸. (a) داده‌های وارد شده در نرم افزار Move، ۸۳ گسل (رنگ قرمز) و ۳۲ رگه (رنگ سفید). (b) مدل‌سازی گسل‌ها و رگه‌ها تا عمق ۳۰۰ متر (گسل‌ها: رنگ قرمز؛ رگه‌ها: رنگ سفید)



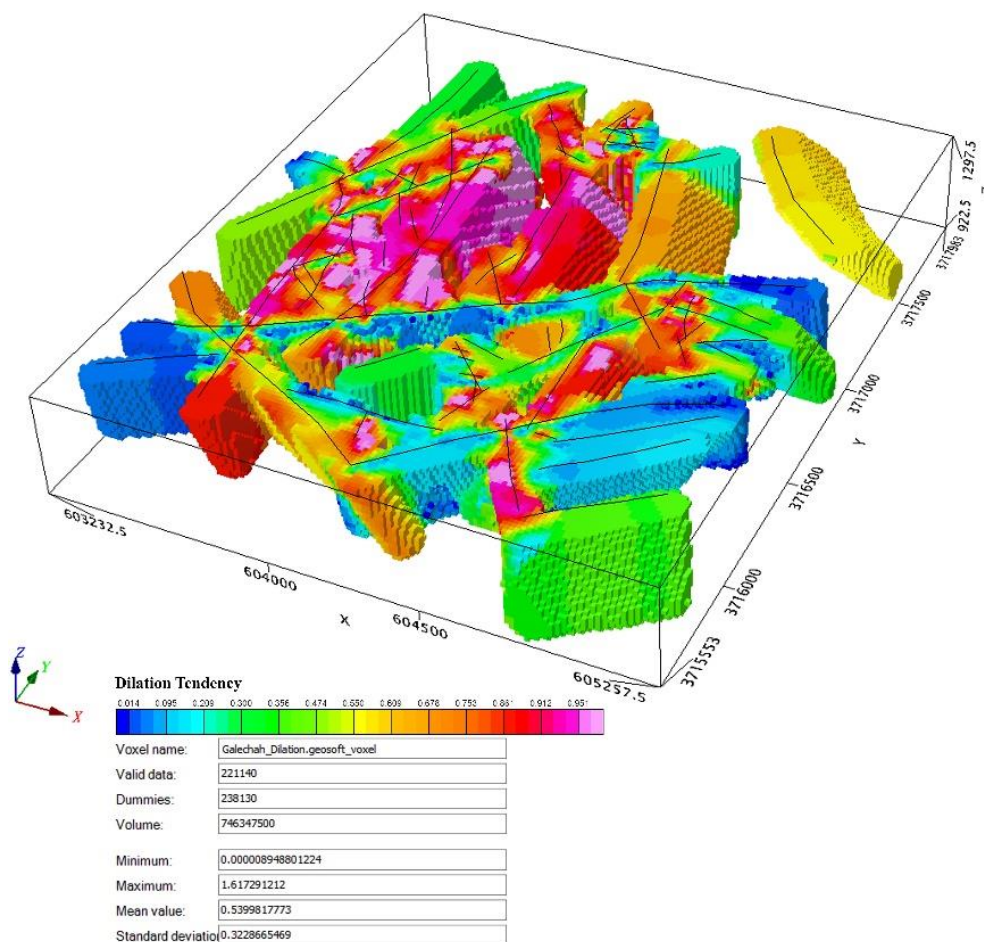
شکل ۹. براساس برداشت‌های ساختاری در محدوده معدنی گله‌چاه، با استفاده از نرم افزارهای Geosoft و Move 2016.1، مدل‌سازی گسل‌ها و رگه‌ها تا عمق ۳۰۰ متر انجام شد (شکل ۸). با اعمال کردن تنش‌های اصلی منطقه، مناطق مستعد لغزش.

با توجه به وزن مخصوص ماده معدنی (۳/۲۵ گرم بر سانتی متر مکعب) و حجم فضاهای پر شده با محلول کانه دار به دست آمده از مدل سازی، ذخیره ماده معدنی تا عمق ۳۰۰ متر برابر با ۶۳۳,۵۹۰ تن به دست می آید. قابل ذکر است که ذخیره قطعی محاسبه براساس سایر روش های اکتشافی، عدد ۵۱۳,۷۷۰ تن را داده است (خطیب، ۱۳۹۹) که تطابق خوبی را نشان می دهد. به هر حال، جهت تأیید بیشتر نتایج این مدل سازی، لازم است که نتایج حاصل از روش های مختلف اکتشاف مورد بررسی قرار گیرند.

در ادامه، ۱۹۹۶۳ نقطه از سطوح گسلی در نرم افزار Oasis montaj وارد و تحلیل شد و نقشه پهنه بندی مناطق مستعد باز شدگی ترسیم گردید (شکل ۱۰). نتایج این مدل سازی نشان داد حجم کل فضاهای باز شده مترمکعب با میانگین (X) ۰/۵۴ و انحراف معیار (S) ۰/۳۲ است. با تعیین آستانه $X+S$ به عنوان حد زمینه، حجم فضاهای باز ممکن ۱۷۴,۸۱۸,۲۵۰ متر مکعب و حجم پر شده با محلول کانه دار ۱۹۴,۹۵۱ متر مکعب (معادل با ۰/۱۱ درصد از کل فضاها) برآورد شد (جدول ۱؛ شکل ۱۲). بنابراین



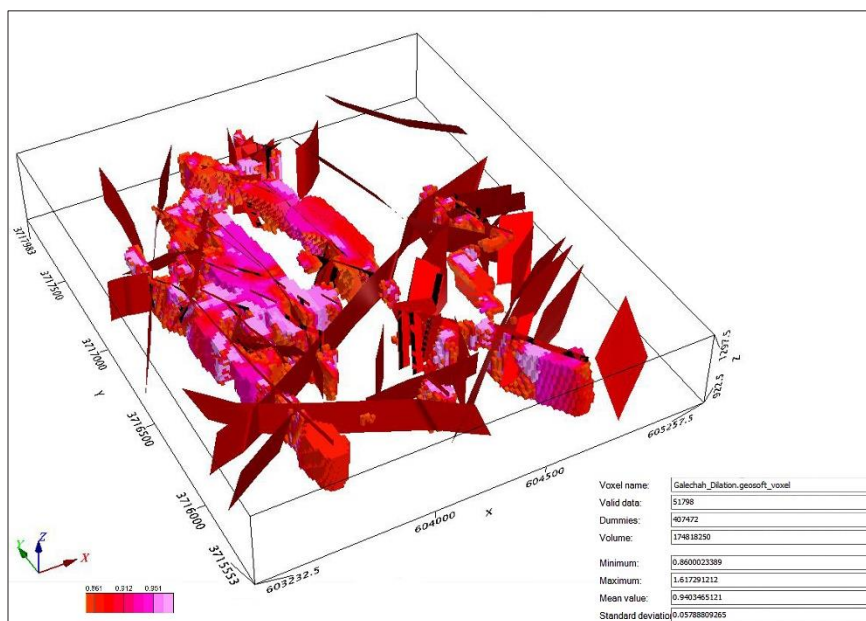
شکل ۱۰. پهنه بندی فضاهای باز شده در محدوده گله چاه به همراه موقعیت رگه ها (سیاه رنگ).



شکل ۱۱. نقشه سه بعدی پهنه‌بندی فضاهای باز شده گسل‌ها در محدوده کله چاه (خطوط سیاه رنگ بیانگر گسل است).

جدول ۱. نتایج حاصل از مدل‌سازی سه بعدی تا عمق ۳۰۰ متری.

پارامتر	مقدار
حجم کل	۱۱۷۱۹۸۲۱۱۸ متر مکعب
فضاهای باز حاصل از شکستگی‌ها	۳۱۷۴۸۱۸۲۵۰ متر مکعب
فضاهای باز حاصل از شکستگی‌ها	۱۴/۹۲ درصد
حجم فضاهای باز پر شده با محلول های کانه دار	۱۹۴۹۵۱ متر مکعب
نسبت فضاهای باز پر شده به کل فضاهای باز	۰/۱۱ درصد



شکل ۱۲. نقشه سه بعدی پهنه‌بندی فضاهای باز شده گسل‌ها در محدوده گله چاه (خطوط سیاه رنگ بیانگر گسل است).

نتیجه‌گیری

در سالیان اخیر، مدل‌سازی به عنوان روشی کارآمد برای کاهش هزینه‌های اکتشاف مواد معدنی مورد توجه ویژه قرار گرفته است. در مطالعه حاضر، با استفاده از روش‌های فرکتالی و با کمک نرم‌افزارهای تخصصی Oasis Montaj، Move و Geosoft، الگوی توزیع شکستگی‌ها و رگه‌های معدنی در محدوده گله چاه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی تا عمق ۳۰۰ متر نشان می‌دهد که ۱۴/۹۲ درصد فضای باز در محدوده مورد مطالعه به وجود آمده است که از این مقدار، حدود ۰/۱۱ درصد توسط محلول‌های کانه‌دار پر شده است. تحلیل‌های فرکتالی حاکی از آن است که بیشترین تراکم کانی‌سازی در بخش غربی محدوده متمرکز شده است. این مدل‌سازی با محاسبه دقیق حجم فضاهای باز و حجم فضاهای باز پُر شده توسط محلول‌های کانه‌ساز، مبنای علمی مناسبی برای برنامه‌ریزی اکتشافی فراهم می‌کند. با در نظر گرفتن وزن مخصوص سنگ‌های میزبان و در نظر گرفتن حجم فضاهای پُر شده با محلول کانه‌دار، می‌توان به برآورد اولیه‌ای از ذخیره معدنی دست یافت. به این ترتیب مقدار ذخیره با این روش برابر با ۶۳۳,۵۹۰ تُن خواهد بود که با مقدار ذخیره قطعی به دست آمده از سایر روش‌های اکتشافی انجام شده (۵۱۳,۷۷۰ تُن) تطابق خوبی دارد. با این حال، باید توجه داشت که تأیید

بیشتر نتایج این مدل‌سازی نیاز به روش‌های اکتشافی کامل‌تری دارد. این رویکرد ترکیبی (مدل‌سازی-میدان) می‌تواند ضمن افزایش دقت برآوردها، موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌های اکتشاف شود.

منابع

- انصاری جعفری، ش.، رحیمی، ب.، قائمی، ف.، و مظلومی بجستانی، ع.، ۱۳۹۴. مدل ساختاری بر پایه مطالعه شکستگی‌ها در کانسار طلای زرمهر. زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ش ۱۷، ص ۱-۱۰.
- خطیب، م.م.، ۱۳۹۹. گزارش نهایی عملیات اکتشاف محدوده پلی متال گله چاه. اداره کل صنعت، معدن و تجارت خراسان جنوبی، ۴۴۴ صفحه.
- خطیب، م. ح.، صادقی فرشلاف، پ.، زرین کوب، م. ح.، و غلامی، ا.، ۱۳۹۸. کنترل‌کننده‌های ساختاری در شکل‌گیری معادن رگه‌ای خاور ایران. مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه بیرجند.
- عبدالهی شریف، ج.، امامعلی پور، ع.، علیپور، ع.، مختاریان اصل، م.، ۱۳۸۹. جایگاه مدل‌سازی سه‌بعدی ذخایر معدنی در بررسی‌های زمین‌شناسی اقتصادی، تعیین ذخیره و ژنز آنها.



- Orogenic gold mineralization in the Qolqoleh deposit, northwestern Iran. *Resource Geology* 57 (3), 269–282.
- Chauvet, A., 2019. Structural control of ore deposits: the role of pre-existing structures on the formation of mineralized vein systems. *Minerals*, 9, 56.
- Cheng, N., Hou, Q., Shi, M., He, M., Liu, Q., Yan, F. and Liu, H., 2019. New Insight into the Genetic Mechanism of Shear Zone Type Gold Deposits from Muping-Rushan Metallogenic Belt (Jiaodong Peninsula of Eastern China). *Minerals* 9, 775.
- Daya, A.A., 2012. Reserve estimation of central part of Choghart north anomaly iron ore deposit through ordinary kriging method. *International Journal of Mining Science and Technology* 22, 573-577.
- Fabricio-Silva, W., Rosière, C.A. and Bühn, B., 2018. The shear zone-related gold mineralization at the Tourmaline deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: structural evolution and the two stages of mineralization. *Mineralium Deposita* 54, 347-368.
- Karimpour, M.H., Stern, C.R., Farmer, L., Saadat, S. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2011. Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut block. eastern Iran. *Journal of Geopersia* 1 (1), 19– 54.
- Kavyani-Sadr, Kh., Rahimi B., Khatib, M.M. and Kim, Y-S., 2022. Assessment of open spaces related to Riedel-shears dip effect in brittle shear zones. *Journal of Structural Geology*, 154 (8), 347-368.
- Kemp, E.A., 2007. 3D geological modeling supporting mineral exploration. In: W.D. زمین‌شناسی اقتصادی، دوره ۲، شماره ۱ (جلد ۲)، ص ۵۱-۵۹.
- علی‌نیا، ه.، خطیب، م.م. و زرین‌کوب، م.ح.، ۱۴۰۲. بررسی ارتباط هندسه شکستگی‌ها با کانی‌سازی رگه‌ای با استفاده از تحلیل تنش دیرین در پهنه بُرشی گاریجگان، خاور ایران. زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۱۳، شماره ۳، ص ۶۲۴-۶۴۰.
- علی‌نیا، ه.، خطیب، م.م. و زرین‌کوب، م.ح.، ۱۴۰۱. ارتباط کانی‌سازی رگه‌ای با تکامل ساختاری در پهنه بُرشی گله‌چاه، خاور ایران. فصلنامه زمین‌ساخت، سال ششم، شماره ۲۱، ص ۳۷-۵۲.
- غلام‌زاده، م.، رحیمی، ب.، قائمی، ف.، احمدی روحانی، ر.، ۱۳۹۴. بررسی شکستگی‌های ساختاری منطقه اخلمد (شمال باختری بینالود) با استفاده از پردازش داده‌های ماهواره‌ای و مطالعه الگوهای فراکتالی سیستم‌های شکستگی. زمین‌ساخت، دوره ۱، شماره ۲، ص ۷۷-۹۲.
- مهرابی، ب.، طالع‌فاضل، ا.، و نخبه‌الفقهایی، ع.، ۱۳۹۰. کانه‌زایی پلی‌متال سرب-روی، مس و آنتیموان نوع انتشاری، رگچه‌ای و رگه‌ای در محدوده معدنی گله‌چاه-شوراب، مجموعه ماگمایی شرق ایران. زمین‌شناسی اقتصادی، دوره ۳، ش ۱، ص ۶۱-۷۷.
- نادری میغان، ن. و اکرمی، م.ع.، ۱۳۷۹. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ آیسک. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- Ahmadi, H. and Pekkan, E., 2021. Fault-based geological lineaments extraction using remote sensing and GIS- A review. *Geosciences* 11 (5), 183.
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and Structural Characteristics of the Paleo-Tethys Remnants in Northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 103(8), 983- 992.
- Aliyari, F., Rastad, E. and Zengqian, H., 2007.

- Mohebi, A., Mirnejad, H., Lentz, D., Behzadi, M., Dolati, A., Kani, A., Taghizadeh, H., 2015. Controls on porphyry Cu mineralization around Hanza Mountain, south-east of Iran: An analysis of structural evolution from remote sensing, geophysical, geochemical and geological data. *Ore Geology Reviews* 69, 187-198.
- Sun, T., Xu, Y., Yu, X., Liu, W., Li, R., Hu, Z., Wang, Y., 2018. Structural controls on copper mineralization in the Tongling Ore District, eastern China: Evidence from spatial analysis. *Minerals*, 8, 254.
- Wang, G., Huang, L., 2012. 3D geological modeling for mineral resource assessment of the Tongshan Cu deposit, Heilongjiang Province, China. *Geoscience Frontiers* 3(4), 483- 491.
- Wilson, C.J.L., Osborne, D.J., Robinson, J.A., Miller, J.M., 2016. Structural constraints and localization of gold mineralization in Leather Jacket Lodes, Ballarat, Victoria, Australia. *Economic Geology*, 111, 1073–1098.
- Zanchi, A., Francesca, S., Stefano, Z., Simone, S. and Graziano, G., 2009. 3D reconstruction of complex geological bodies: examples from the Alps. *Computers and Geosciences* 35(1), 49.
- Goodfellow (Editor), Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. Special Publication 5, 1051-1061.
- Li, X., Yuan, F., Zhang, M., Jia C., Jowitt, S.M., Ord, A., Zheng, T., Hu, X. and Li, Y., 2015. Three-dimensional mineral prospectivity modeling for targeting of concealed mineralization within the Zhonggu iron orefield, Ningwu Basin, China. *Ore Geology Reviews* 71, 633-654.
- Liu, L., Li, J., Zhou, R. and Sun, T., 2016. 3D modeling of the porphyry-related Dawangding gold deposit in south China: Implications for ore genesis and resources evaluation. *Journal of Geochemical Exploration* 164, 164-185.
- Liu, Zh., Guo, Zh., Wang, J., Wang, R., Shan, W., Zhong, H., Chen, Y., Chen, J., Deng, H. and Mao, X., 2023. Three-Dimensional Mineral Prospectivity Modeling with the Integration of Ore-Forming Computational Simulation in the Xiadian Gold Deposit, Eastern China. *Applied Sciences* 13, 1-24.
- Mao, X., Zhang, W., Liu, Zh., Ren, J., Bayless, R.C. and Deng, H., 2020. 3D Mineral Prospectivity Modeling for the Low-Sulfidation Epithermal Gold Deposit: A Case Study of the Axi Gold Deposit, Western Tianshan, NW China. *Minerals* 10, 233.
- Meng, F., Li, X., Chen, Y., Ye, R. and Yuan, F., 2022. Three-Dimensional Mineral Prospectivity Modeling for Delineation of Deep-Seated Skarn-Type Mineralization in Xuancheng–Magushan Area, China. *Minerals* 12, 1174.