



RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/econg.2025.1140



Fractal and 3D Modeling of the Mineralization in the Garijgan Mining Area, Eastern Iran

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

¹ Ph.D., Mining Group, Atlas Afrooz Shargh Company, Mashhad, Iran; Ph.D., Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

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

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

⁴ M.Sc., Mining Group, Atlas Afrooz Shargh Company, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 18 January 2025
Revised: 02 June 2025
Accepted: 07 June 2025

Keywords

fractal modeling
3D modeling
open spaces
paleostress
Garijgan
eastern Iran

*Corresponding author

Hadi Alinia
✉ alinia.hadi.62@gmail.com

ABSTRACT

The Garijgan mineral deposit is a classic NW-SE trending, nonparallel shear zone located 25 km south of Khouf city in South Khorasan Province, eastern Iran. The distribution pattern of fractures and ore veins was investigated by combining remote sensing, fractal modeling, and 3D modeling. In the fractal modeling, the study area was divided into a 19-cell grid. After mapping the structural elements, the fractal dimension was determined using the box-counting method. The results indicate that the highest fractal dimension (1.8378) occurs in the central part of the area, suggesting greater tectonic activity in that part. This could potentially be related to intrusive bodies at depth. Based on fault structures (57 faults in 246 measurements) and 33 mineral veins mapping in 19 cells, and the results from the analysis of the latest stress phase ($\sigma_1 = 3.05$), potential slip zones along the 57 faults were mapped with values ranging from 0 to 1. The fault surfaces were then converted into 18,615 points, and the potential slip zones were spatially delineated. This modeling yielded both the volume of open spaces resulted from fracturing and the potential volume of fluid-filled spaces. The results indicate that from the total open spaces (384,588,750 m³, equivalent to 46.11% of total volume), approximately 306,787 m³ could have been filled with fluids. In other words, 0.08% of the total open spaces had the potential to be filled with fluids (underground water, ore-bearing fluids, etc.). Therefore, this modeling, by determining both the open space volumes and potential fluid-filled spaces, can serve as the first step in mineral exploration planning. The results provide a basis for determining drilling locations and other exploration activities in exploration targets.

How to cite this article

Alinia, H., Khatib, M.M., Zarrinkoub, M.H. and Kouhestanian, M., 2025. Fractal and 3D Modeling of the Mineralization in the Garijgan Mining Area, Eastern Iran. *Journal of Economic Geology*, 17(2): 123–145. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.2025.1140>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Garijgan mining area is located 25 km south of Khouf city in South Khorasan Province in the east of Iran. Structurally situated in the eastern part of the Lut Block, the area is bounded by Doroune Fault to the north, Sistan Suture Zone and Nehbandan Fault to the east, and Nayband Fault to the west. The activity of the Nehbandan and Nayband strike-slip faults, along with their subsidiary branches, has resulted in numerous shear zones in the region (Alinia et al., 2023). These tectonic features act as structural weaknesses, and typically serve as suitable pathways for the migration and deposition of ore-forming fluids (Fabricio-Silva et al., 2018). The study area contains a small, non-parallel shear zone where mineralization has occurred along some of its fractures (Khatib et al., 2019).

The aim of this study is to investigate the distribution of mineralization up to a depth of 300 meters using fractal and 3D modeling. The primary objectives of these models are to estimate the volume of open spaces resulted from fracturing and the proportion of the spaces probably filled with fluids.

Materials and methods

This research combines field studies and remote sensing analyses to statistically evaluate fractures. Landsat 8 and ASTER satellite images were processed to highlight lineaments. For a more detailed structural analysis, the study area was divided into a grid of 19 cells (each one 1×1 cubic kilometers). Structural features were mapped, and rose diagrams of lineaments were generated for each cell. Then, using fractal modeling, the distribution pattern of faults in the region was determined.

In the next step, using Win-Tensor software, the principal stress direction (σ_1) was calculated for each grid, and the focal mechanism resulting from fault kinematics was plotted, leading to the reconstruction of the paleostress pattern of the region.

Finally, to assess the distribution of open spaces resulting from fracturing and the extent of fluid-filled spaces, based on fault structures (57 faults through 246 measurements) and 33 ore veins mapping across 19 cells, 3D modeling were conducted up to 300 meters depth using Move, Oasis Montaj, and Geosoft software.

Discussion

Fractal modeling in this study utilized surface and subsurface litho-geochemical data, applying the box-counting method for each cell. The results indicate that Cell I, with a fractal dimension of 1.8378, exhibits the highest value. Overall, the central part of the area shows the greatest fractal dimension, suggesting high tectonic activity in that region. This may reflect lower tectonic maturity and higher dynamic processes in that part.

Next, Move and Geosoft software were used to identify areas prone to sliding on fault surfaces. The results of the paleo-stress study (Alinia, 2023; Alinia et al., 2023) indicate the occurrence of at least two stress phases related to the Eocene period (in the northeast-southwest direction) and the Quaternary period (in the north-south direction). Based on the direction of maximum stress, fault data (strike, dip, rake, etc.) and mapped ore veins (strike and dip) were put into Move software and extrapolated to a depth of 300 meters.

To quantify open spaces along fault surfaces, 18'615 fault-related points (Alinia, 2023) up to 300 meters deep were analyzed in Oasis Montaj, generation a zoning map of areas prone to opening.

3D modeling and observational data revealed that 306'787 cubic meters of the total open spaces (384'588'750 cubic meters; i.e. 11.46 percent, up to 300 meters depth) could have been filled by fluids, representing 0.08 percents of the total open spaces in the Garijgan area.

Results

Fractal modeling was applied to assess the distribution pattern of fractures and ore veins in the Garijgan area. The results indicate that the highest fractal dimension is located in the central part of the area, which coincides with high tectonic activity in that region.

Additionally, 3D modeling of faults and ore veins (up to a depth of 300 meters) was done using software in order to investigate the open spaces resulted from fracturing and the open spaces filled with the fluids. The results indicate that 384'588'750 cubic meters of open spaces created due to fracturing (equivalent to 11.46% of the total volume within the area up to a depth of 300 meters). Out of these open spaces, 306'787 cubic meters could have been filled with fluids. In other words, 0.08% of the total open spaces

could occupied by fluids (water, ore-bearing fluids, ...).

Thus, this modeling, by determining the volume of open spaces and the volume of spaces potentially

filled with fluids, can serve as the first step in the exploratory program for mining areas, allowing the location of drillings and other exploration activities to be determined.



مدل سازی فرکتالی و سه بعدی کانی سازی در محدوده معدنی گاریجگان، شرق ایران

هادی علی نیا^{۱*}، محمد مهدی خطیب^۲، محمد حسین زرین کوب^۳، مجید کوهستانیان^۴^۱ دکتری، گروه معدنی شرکت اطلس افروز شرق، مشهد، مشهد، ایران؛ گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران^۲ استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران^۳ استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران^۴ کارشناسی ارشد، گروه معدنی شرکت اطلس افروز شرق، مشهد، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

محدوده معدنی گاریجگان، یک پهنه بُرشی ناموازی کلاسیک با راستای شمال غرب- جنوب شرق است که در ۲۵ کیلومتری جنوب شهر خوسف در استان خراسان جنوبی واقع شده است. با تلفیق روش های سنجش از دور، مدل سازی فرکتالی و مدل سازی سه بعدی، الگوی توزیع شکستگی ها و کانی سازی مورد بررسی قرار گرفت. در مدل سازی فرکتالی، محدوده مورد بررسی در یک شبکه ۱۹ سلولی قرار داده شد و بعد از برداشت عناصر ساختاری، با استفاده از روش شمارش جعبه ای، بعد فرکتالی تعیین شد. این مدل سازی بیانگر آن است که بیشترین بعد فرکتالی با مقدار ۱/۸۳۷۸ در قسمت مرکزی منطقه قرار دارد. این وضعیت نشان از فعالیت زمین ساختی بالاتر در مرکز محدوده دارد که احتمالاً می تواند با توده های نفوذی در اعماق مرتبط باشد. با توجه به برداشت های انجام شده از ساختارهای گسلی (۵۷ گسل در قالب ۲۴۶ برداشت) و رگه های معدنی (۳۳ رگه) در ۱۹ سلول و نتایج حاصل از بررسی آخرین مرحله تنش وارد شده ($\sigma_1=3/05$)، مناطق مستعد لغزش روی سطح ۵۷ گسل با مقادیری بین صفر تا ۱ ترسیم شد. سپس سطوح گسلی به ۱۸,۶۱۵ نقطه تبدیل و پهنه بندی مناطق مستعد لغزش انجام شد. به این ترتیب، مدل سازی سه بعدی گسل ها و رگه های معدنی تا عمق ۳۰۰ متر انجام شد و حجم فضاهای باز حاصل از شکستگی ها و حجم فضاهای احتمالی پر شده با سیال ها به دست آمد. نتایج این مدل سازی نشان می دهد که از کل فضاهای خالی (۳۸۴,۵۸۸,۷۵۰ متر مکعب معادل با ۱۱/۴۶ درصد از حجم کل)، ۳۰۶,۷۸۷ متر مکعب آن می توانسته با سیال ها پر شده باشد؛ به بیان دیگر، ۰/۰۸ درصد از کل فضاهای باز، قابلیت پر شدن با سیال ها (آب، سیال کانه دار و ...) را داشته اند. لذا این مدل سازی با تعیین حجم فضاهای خالی و حجم فضاهای احتمالی پر شده با سیال ها، می تواند گام اول برنامه اکتشافی محدوده های معدنی باشد تا بر مبنای آن، محل حفاری ها و سایر موارد اکتشافی تعیین شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

واژه های کلیدی

مدل سازی فرکتالی
مدل سازی سه بعدی
فضاهای باز
تنش دیرین
گاریجگان
شرق ایران

نویسنده مسئول

هادی علی نیا

alinia.hadi.62@gmail.com ✉

استناد به این مقاله

علی نیا، هادی؛ خطیب، محمد مهدی؛ زرین کوب، محمد حسین و کوهستانیان، مجید، ۱۴۰۴. مدل سازی فرکتالی و سه بعدی کانی سازی در محدوده معدنی گاریجگان، شرق ایران. زمین شناسی اقتصادی، ۱۷(۲): ۱۴۵-۱۲۳. <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1140>

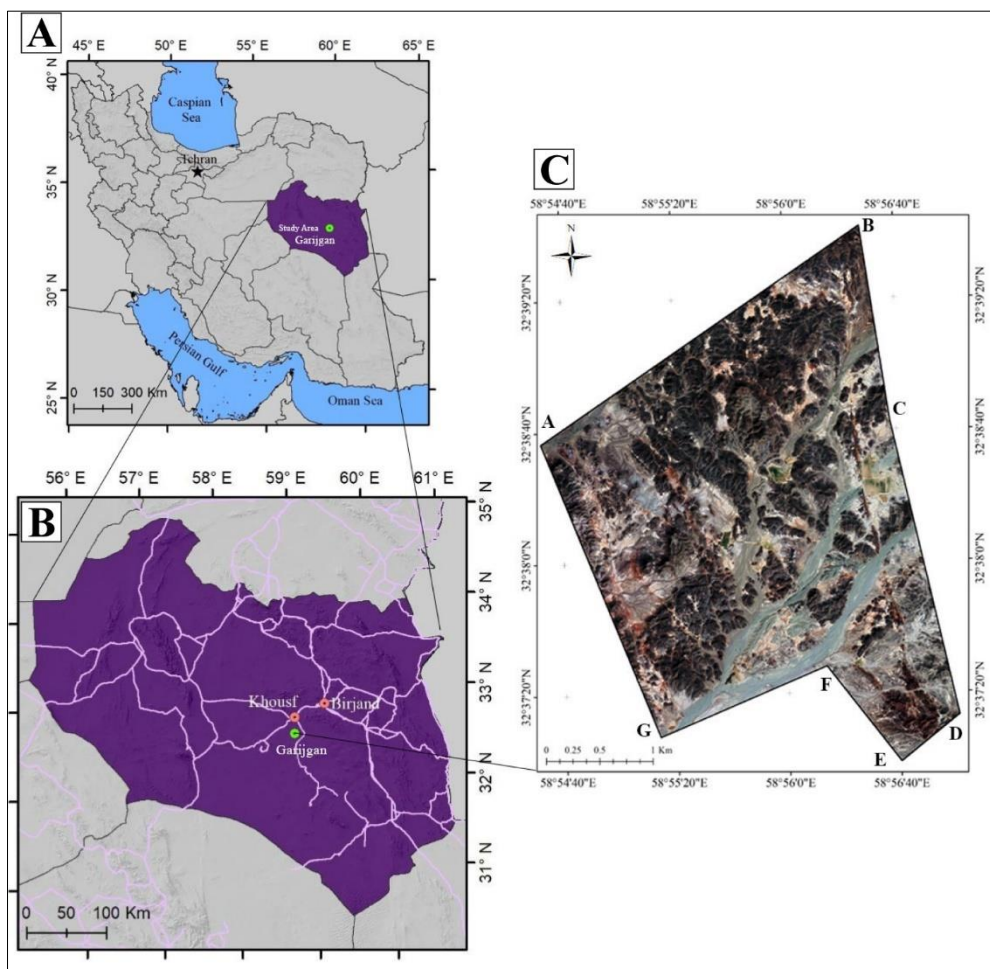
مقدمه

طی سال‌های اخیر، اکتشافات گسترده در نقاط مختلف ایران به کشف ذخایر معدنی متعددی منجر شده است. با این حال، فرایند اکتشاف و برآورد ذخیره در بسیاری از موارد مستلزم صرف هزینه‌های بالایی است؛ لذا توسعه روش‌های نوین و کم هزینه‌تر برای اکتشاف و ارزیابی ذخایر معدنی ضروری به نظر می‌رسد. بررسی‌های نظری و عددی نشان می‌دهند که سامانه‌های کانه‌ساز از پیچیدگی‌های زیادی برخوردارند (Sun and Liangming, 2014). این امر لزوم به کارگیری روش‌های کارآمدتر در اکتشاف و تخمین ذخایر را بیش از پیش آشکار می‌سازد. یکی از راه‌حل‌های پیش‌رو، استفاده از مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی در بررسی‌های زمین‌شناسی، اکتشاف و ارزیابی کمی منابع معدنی است (Kemp, 2007; Zanchi et al., 2009; Abdollahi, Sharif et al., 2010; Afzal et al., 2011; Afzal et al., 2012; Wang and Huang, 2012; Sun and Liangming, 2014; Li et al., 2015; Mao et al., 2020; Jin et al., 2020; Karaman et al., 2021; Meng et al., 2022; Paravarzar et al., 2023; Afzal et al., 2023; Liu et al., 2023; Bazargani Golshan et al., 2024; Bazargani Golshan et al., 2025). برای ساخت مدل‌های سه‌بعدی زمین‌شناسی، می‌توان از داده‌هایی مانند نقشه‌های زمین‌شناسی، گمانه‌ها و ترانسه‌ها بهره‌گرفت. در این فرایند، روش‌های درون‌یابی مانند الگوریتم‌های IDW و کریجینگ معمولی (OK) کاربرد گسترده‌ای دارند (Daya, 2012; Sun and Liangming, 2014). در این پژوهش، با به کارگیری مدل‌سازی فرکتالی و سه‌بعدی، گسترش کانی‌سازی تا ۳۰۰ متر مورد بررسی قرار گرفته است. این عمق بر اساس بررسی‌های ژئوفیزیکی (داده‌های مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی) انجام‌شده توسط کریم‌پور و همکاران (Karimpour et al., 2011) که نشان می‌دهد ساختارهای پهنه‌های برشی در بلوک لوت تا اعماق بیش از ۳۰۰ متر تداوم دارند، انتخاب شده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که عمق ۳۰۰ متری برای بررسی الگوهای کانی‌سازی در منطقه، عمقی مناسب و قابل اعتماد است. هدف نهایی از این مدل‌سازی‌ها،

برآورد حجم فضا‌های باز و حجم فضا‌های احتمالی پر شده با سیال‌هاست. این روش می‌تواند به عنوان مبنایی برای اکتشاف و تعیین محل حفاری‌های عمقی و سایر عملیات اکتشافی مورد استفاده قرار گیرد.

زمین‌شناسی

محدوده معدنی گاریجگان، یک پهنه برشی ناموازی کلاسیک با راستای شمال‌غرب- جنوب‌شرق به طول تقریبی ۴/۷ کیلومتر و عرض حدود ۲/۵ کیلومتر است که در فاصله ۲۵ کیلومتری جنوب شهر خوسف در استان خراسان جنوبی واقع شده است. این محدوده بین عرض‌های جغرافیایی ۵۰° ۳۲' تا ۳۷° شمالی و بین طول‌های جغرافیایی ۳۰° ۵۴' تا ۲۰° ۵۶' شرقی قرار گرفته است و بخشی از ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی خوسف (Vahdati Daneshmand and Kholghi, 1987) به شمار می‌آید (شکل ۱- A، B و C). از دیدگاه زمین‌ساختی، این محدوده بخشی از پهنه لوت به شمار می‌رود. 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 سامانه گسلی اصلی منطقه شامل گسل‌های امتدادلغز راست‌گرد نه‌بندان (در شرق) و نایبند (در غرب) به همراه شاخه‌های فرعی آنها، ساختارهای زمین‌ساختی مهم منطقه را تشکیل می‌دهند که به صورت پهنه‌های برشی متعدد در منطقه ظاهر شده‌اند (Khatib et al., 2019). محدوده معدنی گاریجگان نیز به عنوان یک پهنه برشی شناخته می‌شود که کانی‌سازی مس و طلا در امتداد برخی از شکستگی‌های آن قابل مشاهده است (شکل‌های ۲ و ۳- A و B). پهنه‌های برشی به دلیل ماهیت ضعیف ساختاری خود، نقش مهمی در هدایت سیال‌های کانه‌دار و تشکیل مواد معدنی ایفا می‌کنند (Aliyari et al., 2007; Fabricio-Silva et al., 2018; Cheng et al., 2019; Alinia et al., 2022; Kavyani-Sadr et al., 2022a; Kavyani-Sadr et al., 2022b; Alinia et al., 2023).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده گاریجگان. A: در نقشه ایران، B: در استان خراسان جنوبی و C: تصویر ماهواره‌ای محدوده مورد بررسی

Fig. 1. Location of the Garijgan mining area. A: in Iran map, B: in South Khorasan province, and C: The satellite photo map of the study area

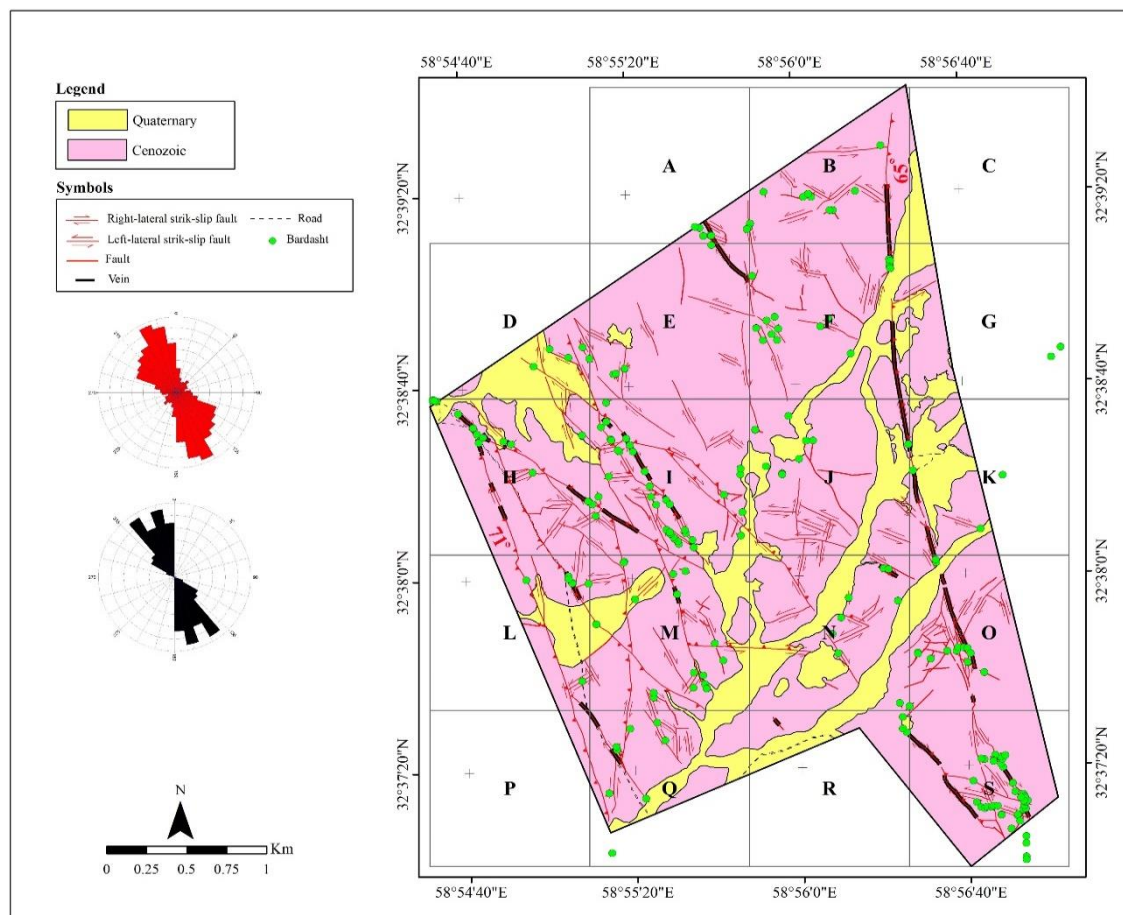
بیشترین فراوانی را دارند و میزبان رگه‌های معدنی هستند. ۲- گسل‌های شمال‌شرقی - جنوب‌غربی (امتدادلغز چپ‌بر) که بدون ماده معدنی هستند و ۳) گسل‌های شرقی - غربی (امتدادلغز چپ‌بر با مؤلفه معکوس) که از نوع فرعی بوده و کانی‌سازی در آنها دیده نمی‌شود. کانی‌سازی در این محدوده اغلب به صورت رگه‌های ژاسپروئیدی (شکل ۳-A) و مرتبط با توده‌های نفوذی انوسن - الیگوسن (به عنوان تأمین‌کننده سیال‌های کانه‌ساز) است. این ژاسپروئیدها که حاصل فعالیت گرمایی هستند، اغلب در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌ها تمرکز یافته‌اند و به عنوان شاخصی برای

مرز شرقی پهنه برشی گاریجگان توسط یک گسل امتدادلغز راست‌بر با مؤلفه شیبی معکوس (شیب ۶۵ درجه به سمت شمال‌شرق) و مرز غربی آن توسط گسل مشابهی با شیب ۷۱ درجه به سمت جنوب‌غرب محدود شده است و بیشتر رگه‌های معدنی در امتداد شکستگی‌های دارای راستای شمال‌غربی - جنوب‌شرقی متمرکز شده‌اند (شکل ۲). بر اساس تحلیل نمودار گل سرخی و هیستوگرام خط‌واره‌ها، شکستگی‌های محدوده معدنی گاریجگان به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند (Alinia, 2023): ۱- گسل‌های شمال‌غربی - جنوب‌شرقی (امتدادلغز راست‌بر با مؤلفه معکوس) که

اکتشاف طلای اپی‌ترمال سولفید پایین کاربرد دارند (Madondo et al., 2021).

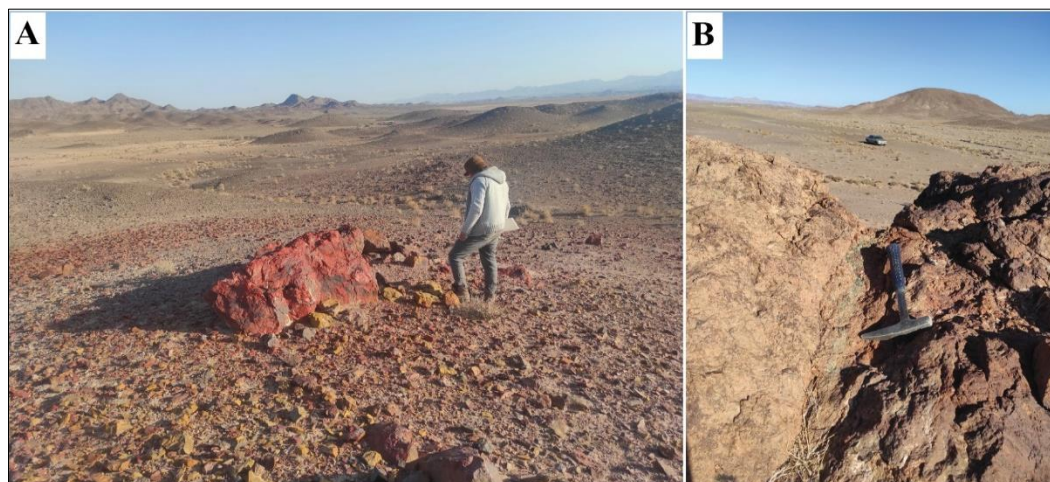
قدیمی‌ترین واحد سنگی در محدوده مورد بررسی، مجموعه آتشفشانی-آذرآواری انوسن با ترکیب حدواسط تا بازیک است که بخش عمده‌ای از منطقه را تحت پوشش قراردادده است. در برخی نقاط، این مجموعه توسط توده‌های نفوذی اسیدی تا حدواسط قطع شده است. رسوب‌های موجود در منطقه اغلب شامل مارن‌های توفی و نهشته‌های کواترنری که به صورت محدود

در برخی بخش‌ها مشاهده می‌شوند. بررسی‌های انجام‌شده بیانگر آن است که سامانه‌های متقاطع گسل‌ها و شکستگی‌های متعدد در محدوده گاریجگان نقش اساسی در هدایت گدازه‌ها و فرایندهای کانه‌زایی داشته‌اند. کانی‌زایی مس اکسیدی و طلا (سولفید پایین) در این منطقه تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله شرایط زمین‌ساختی، دگرسانی‌های گرمایی، فعالیت‌های ماگمایی و توسعه پهنه‌های برشی قرار گرفته است (شکل ۳-A و B).



شکل ۲. نقشه ساختاری منطقه گاریجگان همراه با موقعیت رگه‌های معدنی. در این نقشه، نمودار گل سرخی قرمز رنگ مربوط به گسل‌ها و نمودار گل سرخی سیاه مربوط به رگه‌های کانی‌سازی است. چنان‌که دیده می‌شود، بیشتر رگه‌های معدنی در امتداد شکستگی‌های دارای روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق متمرکز شده‌اند.

Fig. 2. The structural map of the Garijgan area along with the location of the ore veins. (The red rose diagram corresponds to faults and the black one corresponds to mineralization veins.) As can be seen, most of the mineral veins are concentrated along fractures with a northwest- southeast trend.



شکل ۳. کانی‌سازی رگه‌ای در محدوده گاریجگان. A: کانی‌سازی همراه با رگه‌های ژاسپ در امتداد گسل‌های پهنه برشی و B: کانی‌سازی رگه‌ای مس

Fig. 3. The vein-style mineralization in the Garijgan area. A: Mineralization in association with jasper veins in the shear zone faults, and B: Copper vein mineralization

2023). در این پژوهش، ابتدا داده‌های لندست ۷ با تفکیک مکانی ۱۵ متر (داده تلفیقی با باند ۸) پردازش و تفسیر شد تا نقشه پایه شکستگی‌ها تهیه شود. پس از شناسایی خط‌واره‌ها، منطقه مورد بررسی به یک شبکه ۱۹ سلولی (هر سلول به اندازه ۱×۱ کیلومتر) با مساحت کلی ۱۹ کیلومتر مربع تقسیم‌بندی شد تا کنترل‌کننده‌های ساختاری به دقت بررسی شوند. سپس عوارض ساختاری (۵۷ گسل در قالب ۲۴۶ برداشت) و ۳۳ رگه معدنی در هر سلول برداشت شد و نمودارهای گل سرخی گسل‌ها و رگه‌های کانی‌سازی ترسیم شد.

در گام بعدی، با استفاده از نرم‌افزار Win-Tensor، راستای تنش اصلی (σ_1) برای هر شبکه محاسبه و سازوکار کانونی ناشی از کینماتیک گسل‌ها ترسیم شد که به بازسازی الگوی تنش دیرین منطقه منجر شد. در نهایت، با توجه به نتایج حاصل از بازسازی راستای تنش اصلی و برداشت‌های ساختاری در ۱۹ سلول، مدل‌سازی سه‌بعدی ساختارهای زمین‌شناسی تا عمق ۳۰۰ متر با نرم‌افزارهای Move2016.1 و Geosoft انجام شد. این رویکرد جامع، امکان شناسایی دقیق روندهای ساختاری مؤثر در

شواهد زمین‌شناسی مختلف (از جمله شکل رگه-رگچه‌ای ماده معدنی، دگرسانی ژاسپرویدی، آرژیلیک و آلونیتی، بافت شانه‌ای و رشته‌ای و...) نشان‌دهنده آن است که کانی‌سازی از نوع اپی‌ترمال بوده و ساختارهای حاصل از تنش‌های منطقه (شامل شبکه درزه‌ها و شکستگی‌های فرعی) بهترین بستر را برای تمرکز مواد معدنی فراهم کرده‌اند. از سوی دیگر، تحلیل هندسه ساختاری منطقه نشان می‌دهد که تقاطع پهنه‌های برشی و تشکیل بلوک‌های گسلی در امتداد رگه‌های معدنی، عامل اصلی کنترل‌کننده توزیع کانی‌زایی در این محدوده بوده است. این یافته‌ها می‌تواند در برنامه‌ریزی اکتشافات آینده منطقه راه‌گشا باشد.

روش مطالعه

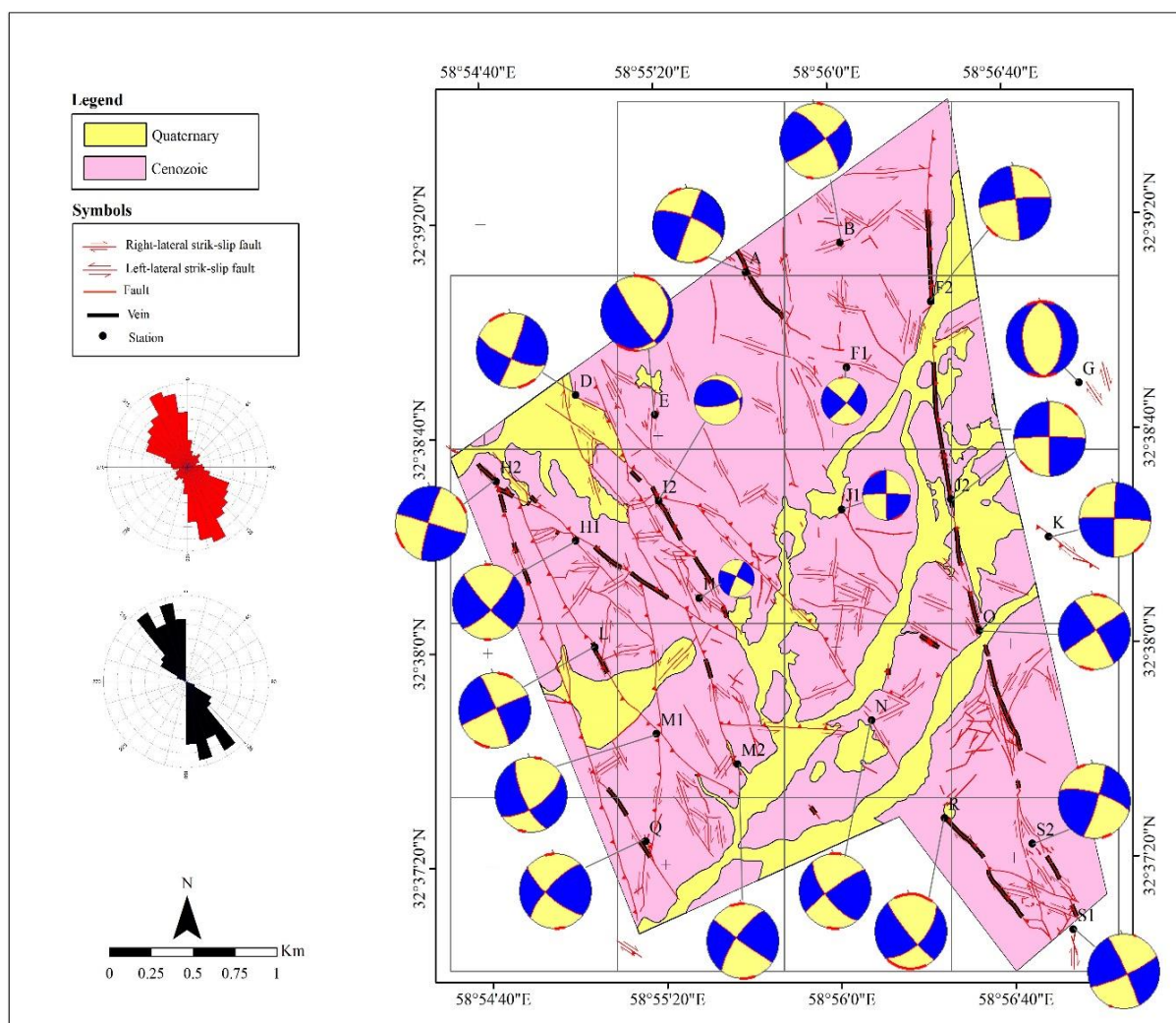
امروزه برای بررسی‌های آماری شکستگی‌ها، علاوه بر برداشت‌های صحرایی، از روش‌های دیگر مانند سنجش از دور و پردازش داده‌های ماهواره‌ای نیز برای تهیه نقشه پراکندگی شکستگی‌ها استفاده می‌شود (Gholamzadeh et al., 2015; Ahmadi, 2015; Alinia et al., 2022; Alinia et al., and Pekkan, 2021).

کانی‌سازی و ارزیابی پتانسیل معدنی منطقه را فراهم آورد.

بحث و تحلیل

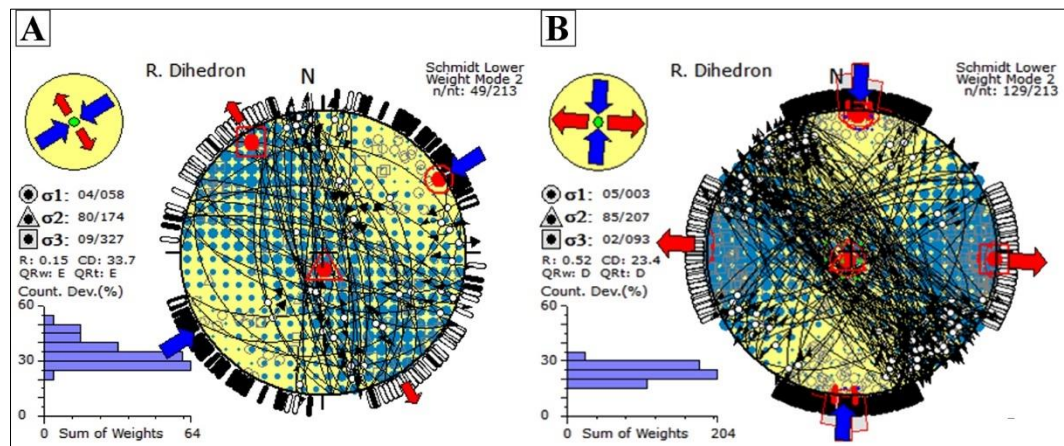
تحلیل ساختارهای گسلی در محدوده گاریجگان نشان می‌دهد که این منطقه دست کم دو فاز تنش اصلی را تجربه کرده است (Alinia et al., 2023) (شکل‌های ۴ و ۵-A و B). در ائوسن، رژیم تنش به صورت فشارشی با جهت شمال‌شرقی - جنوب‌غربی

($\sigma_1=58/04$) و گسل‌های امتدادلغز غالب بوده است، در حالی که مجاورت با توده‌های آذرین باعث ایجاد رژیم تراکششی محلی شده است. در کواترنری، جهت تنش به شمالی - جنوبی ($\sigma_1=3/05$) تغییر یافته و رژیم به ترافشارشی - امتدادلغز تبدیل شده است. این تغییرها نشان‌دهنده چرخش حدود ۵۵ درجه‌ای محور σ_1 خلاف جهت عقربه‌های ساعت از ائوسن تا کواترنری است.



شکل ۴. نقشه ساختاری محدوده گاریجگان به همراه موقعیت رگه‌ها و سیکلوگراف آنها در ایستگاه‌های برداشت‌شده. نمودار گل سرخی قرمز مربوط به گسل‌ها و نمودار گل سرخی مشکی مربوط به رگه‌های کانی‌سازی است.

Fig. 4. Structural map of the Garijgan area with the location of ore veins and their cyclographs at the stations measured. The red rose diagram corresponds to faults and the black one is ore veins.



شکل ۵. A: موقعیت محورهاى تنش حاکم بر محدوده گاریجگان در زمان ائوسن و B: موقعیت محورهاى تنش حاکم بر محدوده در زمان کواترنری

Fig. 5. A: The position of the stress axes imposed on the Garijgan area during the Eocene, and B: The position of the stress axes governing on the area during the Quaternary

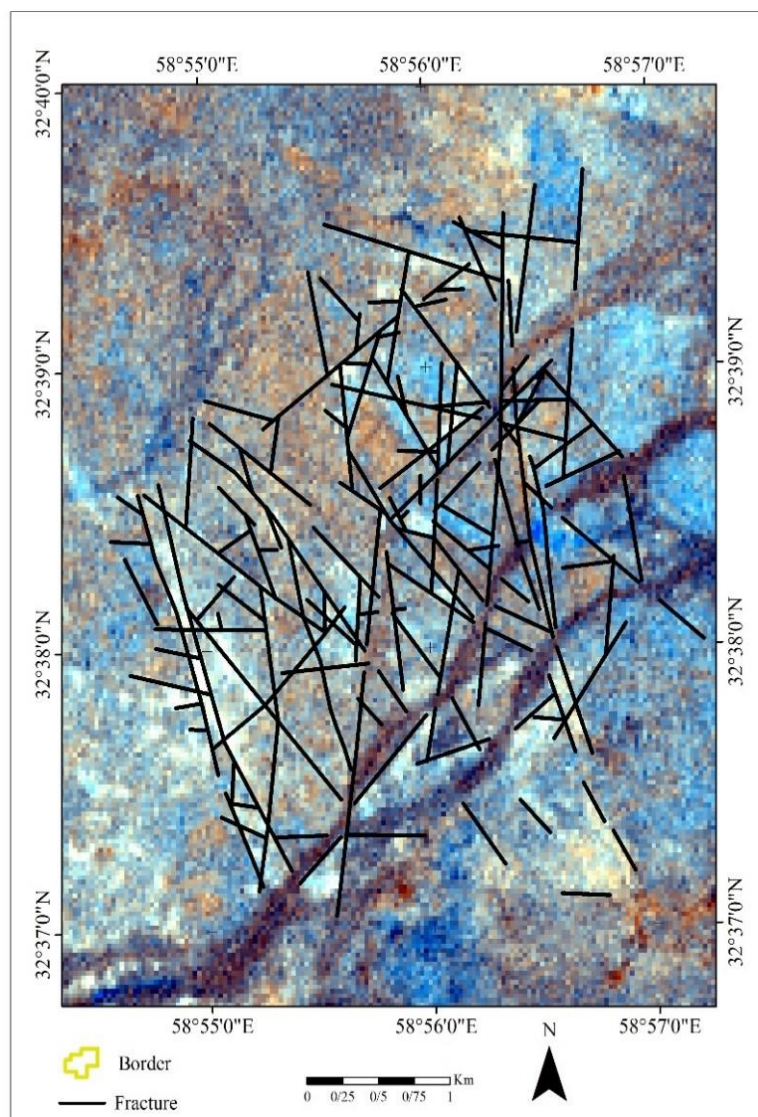
مقادیر میانگین منطقه‌ای هر مؤلفه هستند. نتایج به دست آمده از این مدل‌سازی نشان می‌دهد که تراکم شکستگی‌ها در سلول‌های I، O و S بیشترین مقدار را دارد. این موضوع بیانگر فعالیت زمین‌ساختی بالاتر این مناطق است (شکل ۷). به علاوه، الگوی تراکم شکستگی‌ها با جهت تنش بیشینه منطقه و تمرکز رگه‌های معدنی همخوانی دارد (شکل ۸). این انطباق می‌تواند نشان‌دهنده ارتباط ساختارها با توده‌های نفوذی در اعماق باشد. به هر حال تأیید نهایی این موضوع نیاز به بررسی‌های ژئوفیزیکی دارد.

سپس در گام بعدی، مدل‌سازی فرکتالی شکستگی‌ها با روش شمارش جعبه‌ای انجام شد. برای این منظور، منطقه مورد بررسی با شبکه‌ای از مربع‌های به ابعاد (r) پوشانده شد و تعداد مربع‌های حاوی گسل‌ها (N(r)) در هر مرحله شمارش شد. با ترسیم نمودار $\log(r)$ در برابر $\log(N(r))$ و محاسبه شیب خط رگرسیون، بعد فرکتالی محاسبه شد. نتایج محاسبات فرکتالی نشان می‌دهد که سلول I با بیشترین مقدار (۱/۸۳۷۸) و سلول M با مقدار ۱/۷۴۲۳ به ترتیب بالاترین ابعاد فرکتالی را دارند (شکل ۹). این الگو نشان‌دهنده تمرکز بیشترین فعالیت زمین‌ساختی در مرکز محدوده و بیانگر بلوغ زمین‌ساختی کمتر و پویایی بالاتر این ناحیه است.

در همین راستا، بر اساس داده‌های کینماتیک گسل‌ها و تحلیل میدان تنش دیرین در بخش شمالی کمربند کوه‌زایی سیستان در شرق ایران، مشخص شده است که رژیم تنش شرق ایران در سنوزوئیک پایانی تغییرهای شدیدی را پشت سر گذاشته است (Jentzer et al., 2017). این تغییرها شامل سه مرحله چرخش جهت تنش اصلی (σ1) از N90 در میوسن میانی-پایانی به N60 در پلیوسن پایانی و سپس به N25 در پلیو-کواترنری بوده است. این سیر تحول، نشان‌دهنده چرخش حدود ۶۵ درجه‌ای σ1 در مدت کمتر از ۱۰ میلیون سال خلاف جهت عقربه‌های ساعت است (Jentzer et al., 2017).

مدل‌سازی دوبعدی شکستگی‌ها و رگه‌های معدنی

در گام اول این مدل‌سازی، با پردازش تصاویرهای ماهواره‌ای، خط‌واره‌های منطقه شناسایی و ترسیم شد (شکل ۶). سپس با استفاده از روش هاردکستل در نرم‌افزار ArcGIS، نقشه تراکم گسل‌ها با محاسبه مؤلفه‌های طول (a)، تقاطع (b) و تعداد خط‌واره‌ها (c) در هر سلول تهیه شد. این محاسبات بر اساس رابطه $pf = (a/A) + (b/B) + (c/C)$ انجام شد که در آن A، B و C



شکل ۶. تصویر نهایی حاصل از پردازش PCA ترکیب PC4-، PC4+PC5- و PC5 در رنگ‌های قرمز، سبز و آبی را نشان می‌دهد که برای شناسایی مناطق دگرسانی گرمابی استفاده شده است. در این تصویر، پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده نواحی دارای هر دو نوع دگرسانی هیدروکسیل و اکسید آهن هستند؛ در حالی که رنگ‌های آبی روشن تا تیره، مناطقی با غلظت بالاتر هیدروکسیل را مشخص می‌کنند. مناطق غنی از اکسید آهن نیز به رنگ‌های زرد و نارنجی ظاهر شده‌اند. خطوط سیاه نیز موقعیت خطواره‌ها را نمایش می‌دهند.

Fig. 6. The final image from the PCA processing shows the combination of PC4-, PC4+PC5- and PC5 in red, green and blue colors, which were used to identify hydrothermal alteration zones. In this image, bright pixels indicate areas with both hydroxyl and iron oxide alteration, while light to dark blue colors indicate areas with higher hydroxyl concentrations. Iron oxide-rich areas appear in yellow and orange colors, and black lines indicate the location of lineaments.

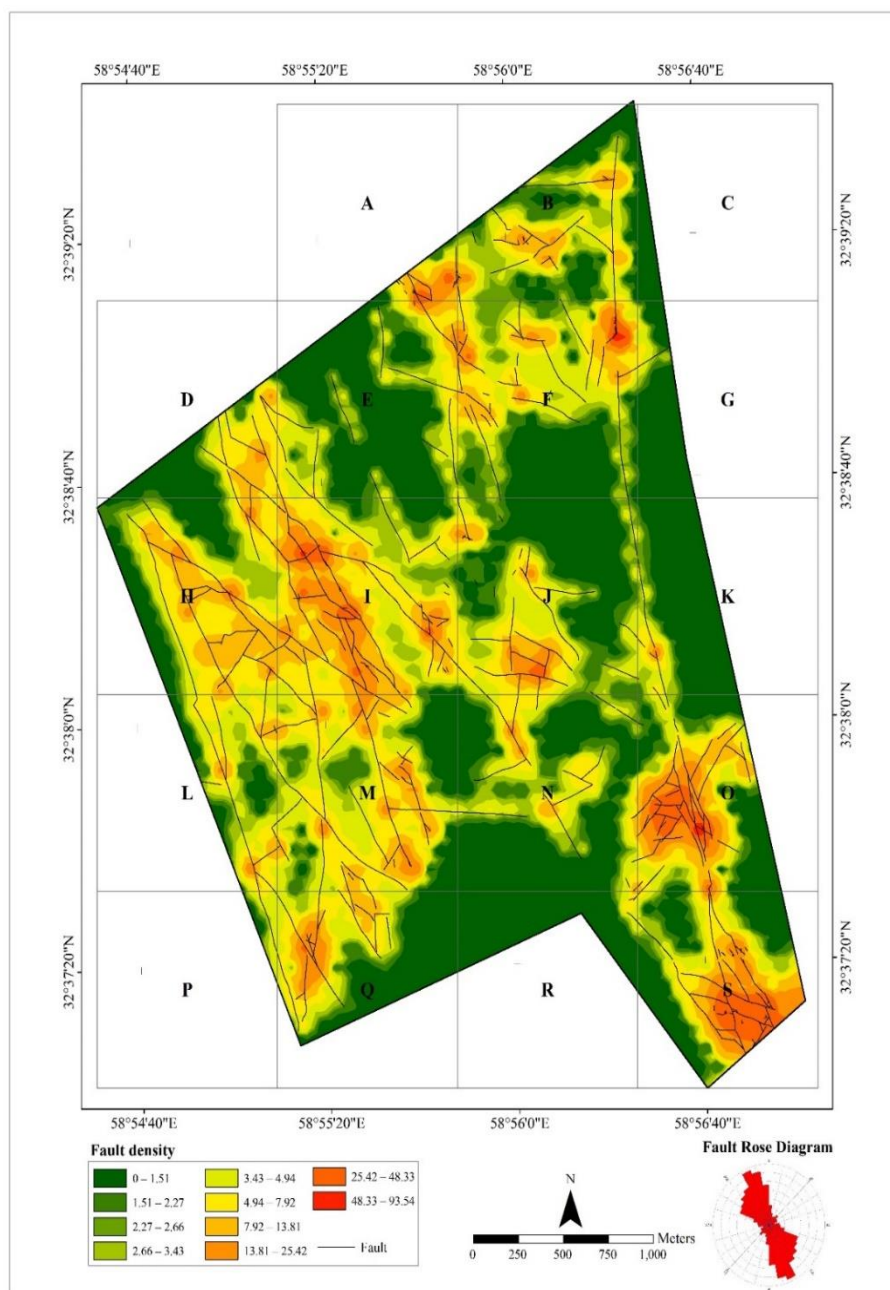
مدل‌سازی سه‌بعدی گسل‌ها و رگه‌های کانی‌سازی

ابتدا نقشه ساختاری منطقه بر اساس برداشت‌های صحرایی (۵۷)

گسل با ۲۴۶ برداشت و ۳۳ رگه معدنی تهیه شد (شکل ۴). سپس

برای تحلیل پتانسیل لغزش در سطوح گسلی محدوده گاریجگان،

با استفاده از نرم‌افزارهای 2016.1 Move و Geosof، گسل‌ها و رگه‌های معدنی (بر اساس امتداد و شیب) مدل‌سازی شد (شکل ۱۰ و جدول ۱). (با مؤلفه‌های هندسی کامل شامل امتداد، شیب، ریک و سازوکار)

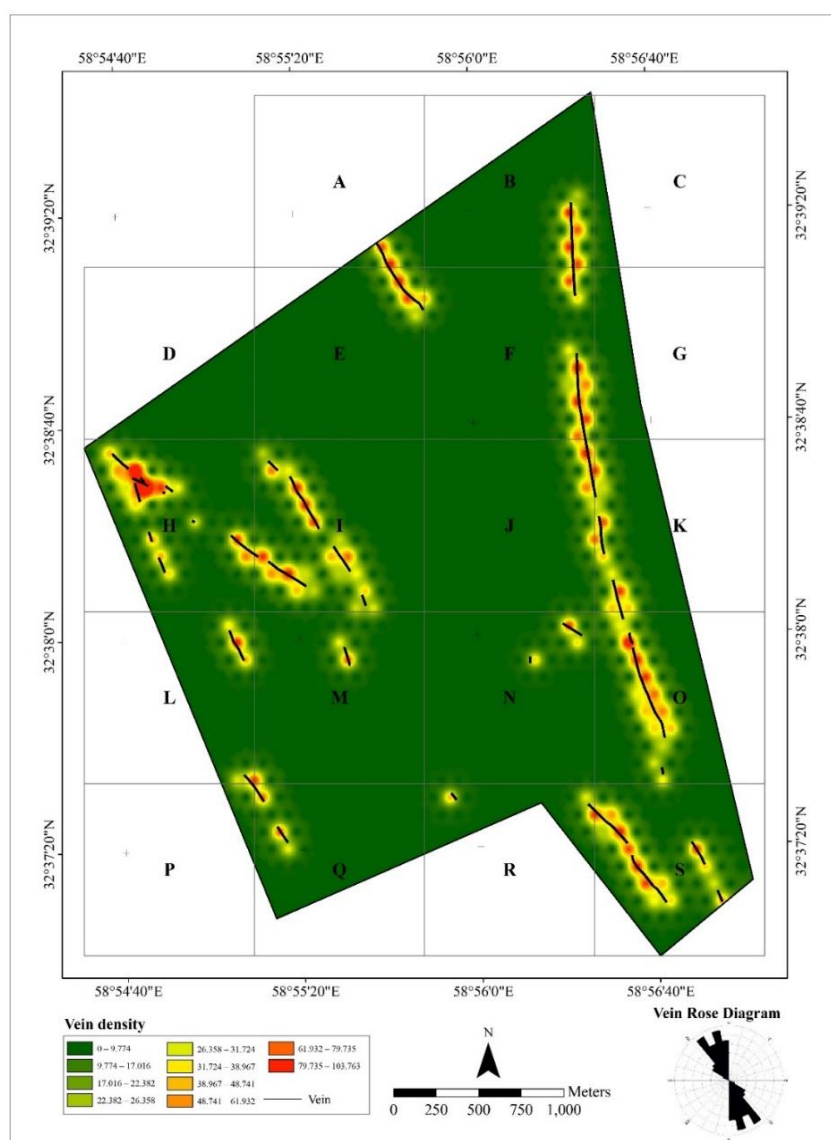


شکل ۷. نقشه تراکم گسل‌ها در شبکه ۱۹ سلولی ایجاد شده برای محدوده گاریجگان. چنان‌که دیده می‌شود، سلول‌های I، O و S بیشترین تمرکز گسل‌ها را دارند که نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی بالاتر آنهاست.

Fig. 7. Fault density map in the 19-cell grid created for the Garijgan area. As can be seen, cells I, O, and S have the highest density of faults, indicating their higher tectonic activity.

2011) که نشان می‌دهد ساختارهای پهنه‌های برشی در بلوک لوت تا اعماق بیش از ۳۰۰ متر تداوم دارند، انتخاب شده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که عمق ۳۰۰ متری برای بررسی الگوهای کانی‌سازی در منطقه، عمقی مناسب و قابل اعتماد است.

این مدل‌سازی تا عمق ۳۰۰ متری انجام شد تا مناطق مستعد لغزش تحت تأثیر تنش‌های اصلی منطقه شناسایی شوند. این عمق بر اساس بررسی‌های ژئوفیزیکی (داده‌های مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی) انجام شده توسط کریم‌پور و همکاران (Karimpour et al.,)

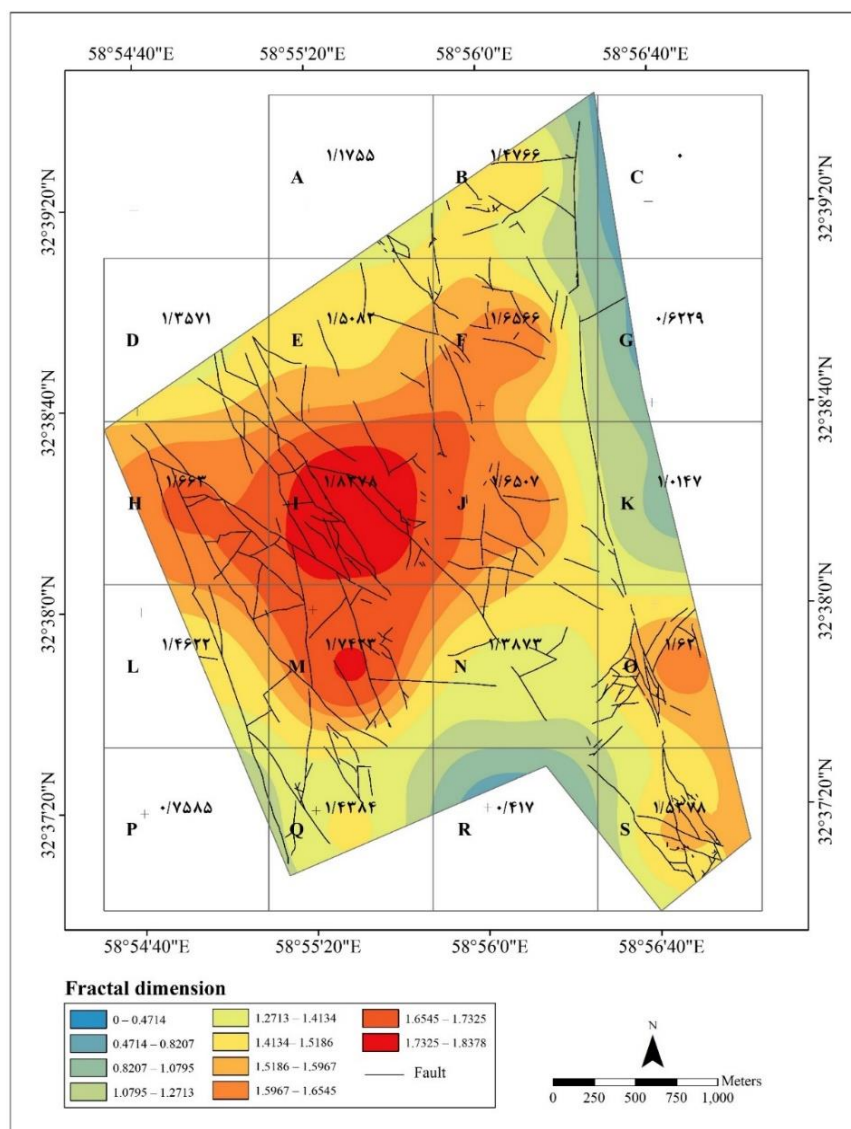


شکل ۸. نقشه تراکم رگه‌های معدنی در شبکه ۱۹ سلولی ایجاد شده در محدوده گاریجگان. چنان‌که مشخص است سلول‌های I و S بیشترین تمرکز رگه‌های معدنی را دارند که انطباق خوبی با تمرکز گسل‌ها نشان می‌دهد.

Fig. 8. Density map of ore veins in the 19-cell grid created for the Garijgan area. As observed, cells I and S exhibit the highest concentration of ore veins, showing a good correlation with fault densities.

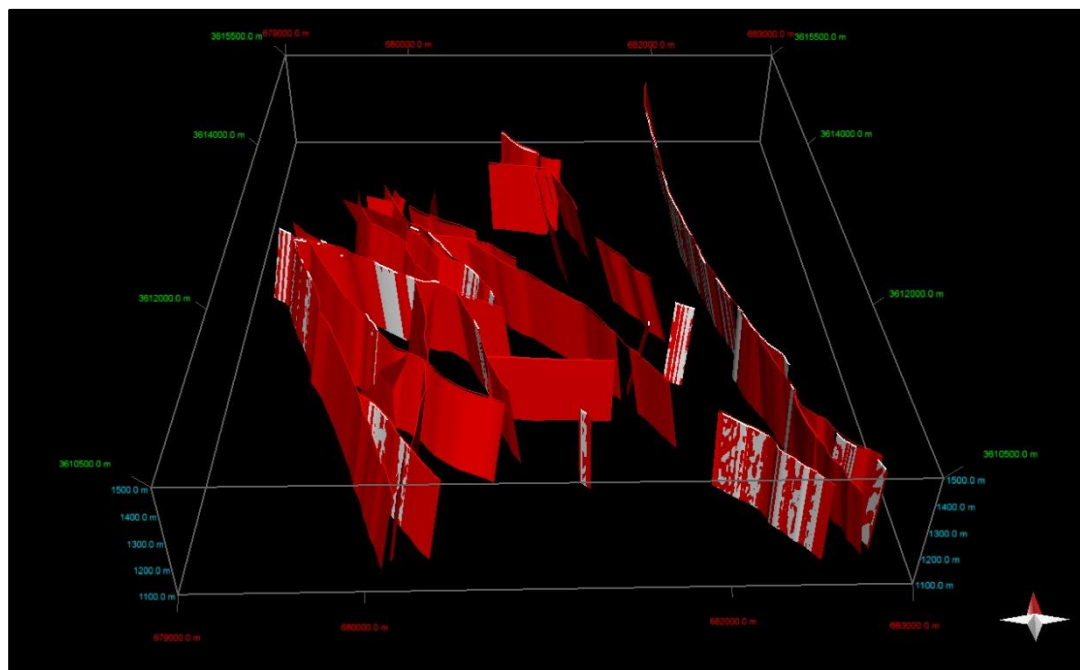
در مرحله نهایی مدل‌سازی، آخرین تنش محاسبه شده ($\sigma_1=3/05$) اعمال شد و مناطق مستعد لغزش روی سطح ۵۷ گسل با مقادیری بین صفر تا ۱ ترسیم شد. به منظور انتقال این سطوح گسلی به نرم‌افزار Oasis Montaj، لازم بود سطوح به نقاط مجزا تبدیل شوند؛ بنابراین با استفاده از نرم‌افزار Move، این سطوح به

۱۸۶۱۵ نقطه تبدیل شد. در ادامه، در محیط نرم‌افزار Oasis Montaj، پهنه‌بندی مناطق مستعد لغزش انجام شد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده پتانسیل بالاتر گسیختگی و فضای باز بیشتر در آن نواحی است.



شکل ۹. نقشه فرکتال شکستگی‌های محدوده معدنی گاریجگان. چنان‌که دیده می‌شود، سلول I در بخش مرکزی محدوده (با مقدار ۱/۸۳۷۸)، بیشترین بعد فرکتالی را دارد.

Fig. 9. Fractal map of the fractures in the Garijgan mining area. As can be seen, cell I in the central part of the area (1.8378 value) has the highest fractal dimension.



شکل ۱۰. مدل‌سازی گسل‌ها و رگه‌های معدنی تا عمق ۳۰۰ متر در محدوده گاریجگان (گسل‌ها به رنگ قرمز و رگه‌های معدنی به رنگ سفید)

Fig. 10. Faults and ore veins modeling in the Garijgan area up to 300 meters depth (Red colors represent faults; white colors represent ore veins)

جدول ۱. مشخصات رگه‌های معدنی برداشت شده در محدوده گاریجگان

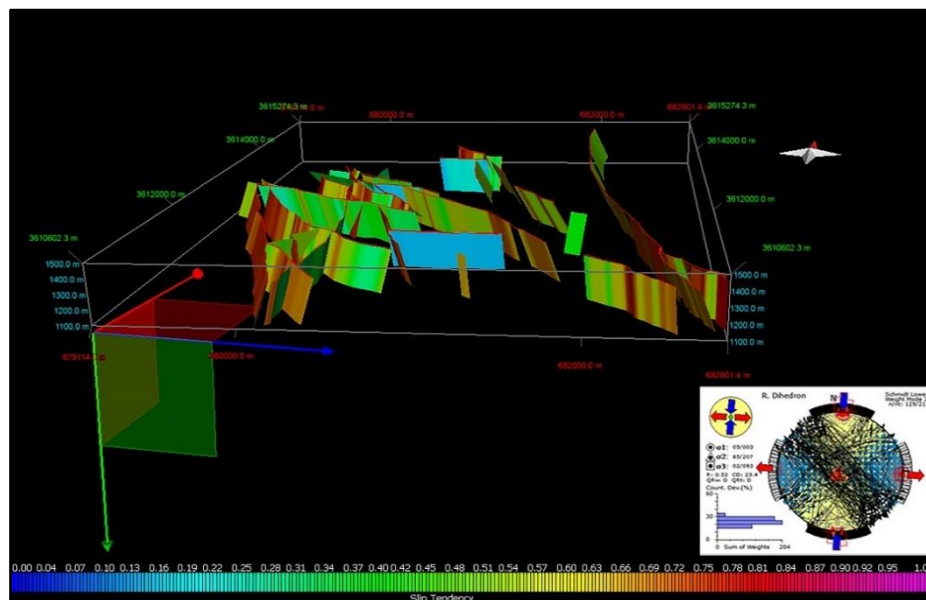
Table 1. Characteristics of the measured ore veins in the Garijgan area

VEINS	XSTART	YSTART	XEND	YEND	THICKNESS (CM)	LENGTH (M)	STRIKE	DIP
V1	681904	3614803	681929	3614259	20	487	89	65NE
V2	681939	3613926	682050	3613089	30	722	81	65NE
V3	682070	3612979	682102	3612758	10	198	85	63NE
V4	682154	3612609	682214	3612379	15	207	76	64NE
V5	682249	3612302	682268	3612236	10	61	65	84NE
V6	682268	3612216	682458	3611691	15	454	63	84NE
V7	682441	3611520	682449	3611478	15	39	78	84NE
V8	682616	3611088	682694	3610955	15	105	40	89NE
V9	682768	3610806	682796	3610739	15	69	68	90NE
V10	682267	3611010	682470	3610736	15	289	55	85NE
V11	682008	3611306	682239	3611078	15	269	55	85NE
V12	681857	3612356	681972	3612286	20	105	214	74SW
V13	681668	3612166	681668	3612126	20	34	269	69SW
V14	681202	3611369	681234	3611330	15	39	50	85NE
V15	680760	3614569	681038	3614176	10	409	50	85NE
V16	680125	3613300	680183	3613245	15	71	43	81NE
V17	680253	3613210	680426	3612905	25	308	75	41NE

ادامه جدول ۱. مشخصات رگه‌های معدنی برداشت‌شده در محدوده گاریجگان

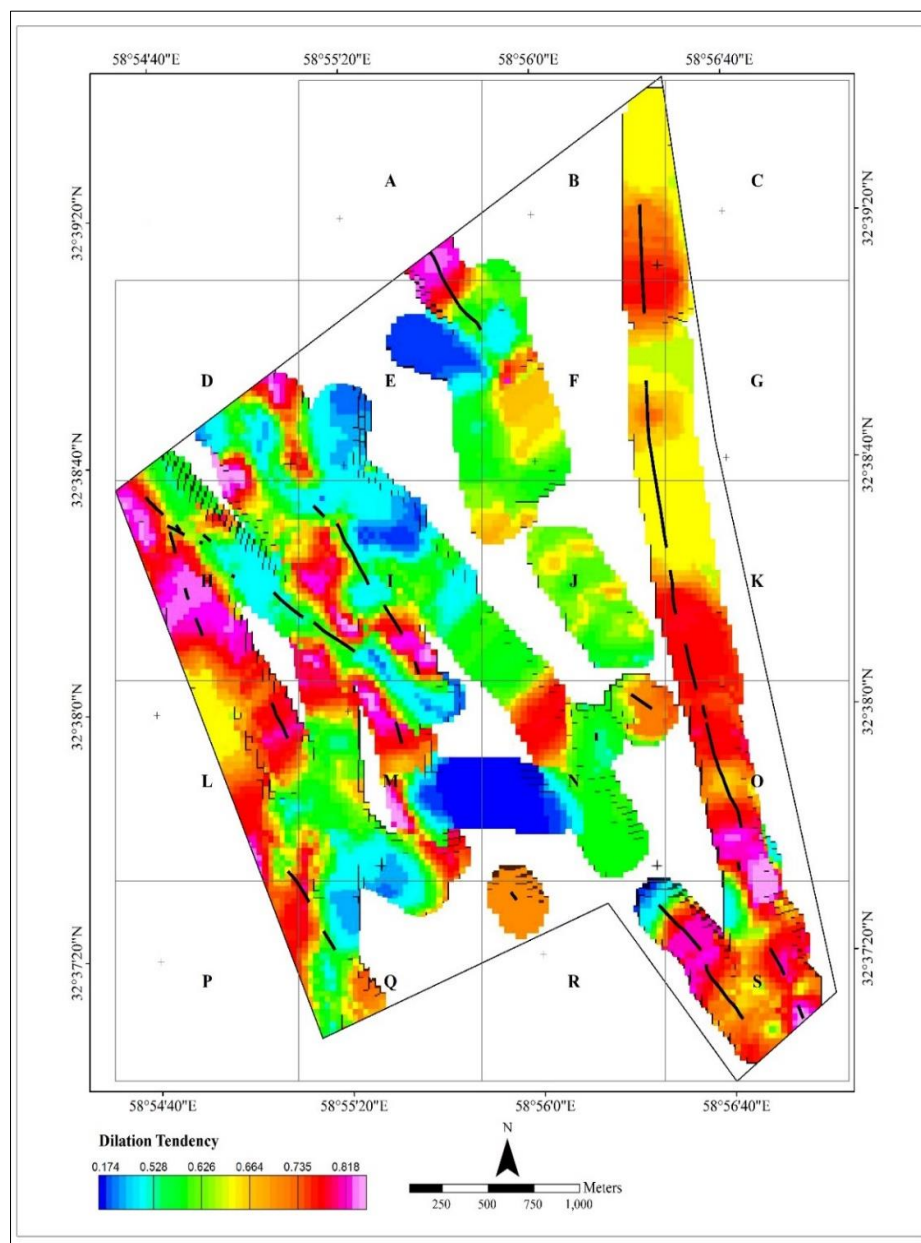
Table 1 (Continued). Characteristics of the measured ore veins in the Garijgan area

VEINS	XSTART	YSTART	XEND	YEND	THICKNESS (CM)	LENGTH (M)	STRIKE	DIP
V18	680510	3612804	680608	3612657	15	141	245	74SW
V19	680678	3612522	680701	3612458	35	57	245	74SW
V20	680572	3612220	680607	3612110	20	101	85	76NE
V21	680126	3612716	680351	3612571	25	205	30	81NE
V22	679907	3612867	680070	3612744	25	156	30	81NE
V23	679504	3613119	679521	3613112	10	19	30	81NE
V24	679524	3613155	679566	3613122	25	47	35	80NE
V25	679376	3613203	679399	3613173	30	33	45	81NE
V26	679328	3613199	679423	3613154	15	96	30	81NE
V27	679210	3613343	679305	3613253	25	104	250	70SW
V28	679343	3613171	679372	3613062	15	98	250	70SW
V29	679425	3612888	679444	3612830	10	55	250	70SW
V30	679483	3612738	679520	3612650	15	82	250	70SW
V31	679898	3612315	679986	3612139	25	138	235	73SW
V32	679985	3611474	680102	3611319	10	129	239	71SW
V33	680180	3611175	680243	3611081	10	103	239	71SW



شکل ۱۱. مناطق مستعد لغزش روی سطوح گسل تحت تأثیر تنش‌های وارده شده. در این نمودار، محورهای قرمز (σ_1)، سبز (σ_2) و آبی (σ_3) جهت‌های اصلی تنش را نمایش می‌دهند که نواحی قرمز رنگ آن بیانگر بیشترین پتانسیل لغزش است.

Fig. 11. Areas prone to slip on the fault surfaces under the influence of applied stresses. In this diagram, the red (σ_1), green (σ_2), and blue (σ_3) axes represent the principal stress directions, with the red areas indicating the highest slip potential.

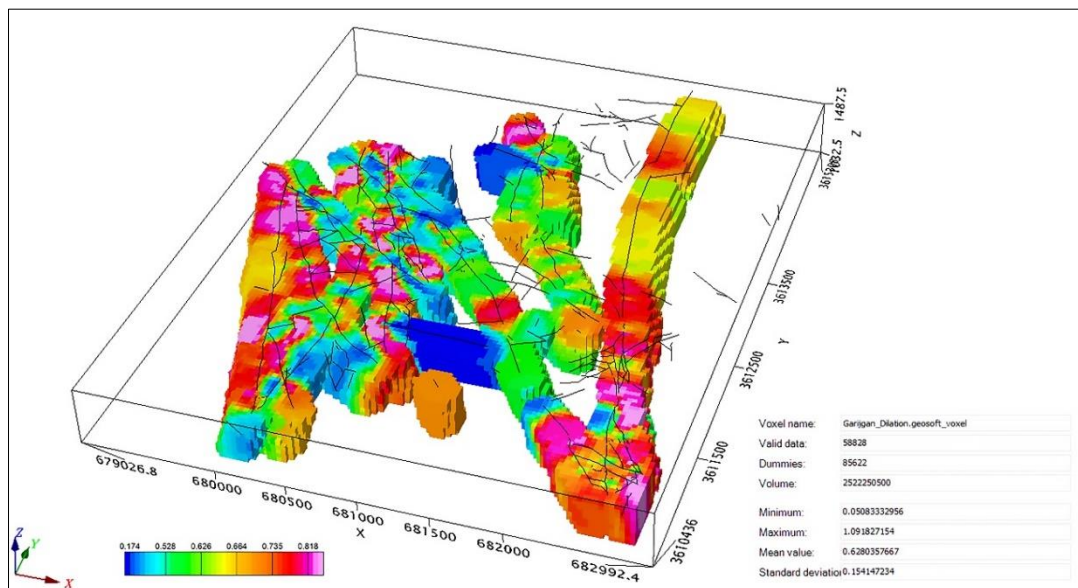


شکل ۱۲. پهنه‌بندی فضاهای باز شده به همراه موقعیت رگه‌ها (سیاه رنگ) در محدوده گاریجگان

Fig. 12. Open spaces zoning along with ore vein locations (black color) in Garijgan mining area

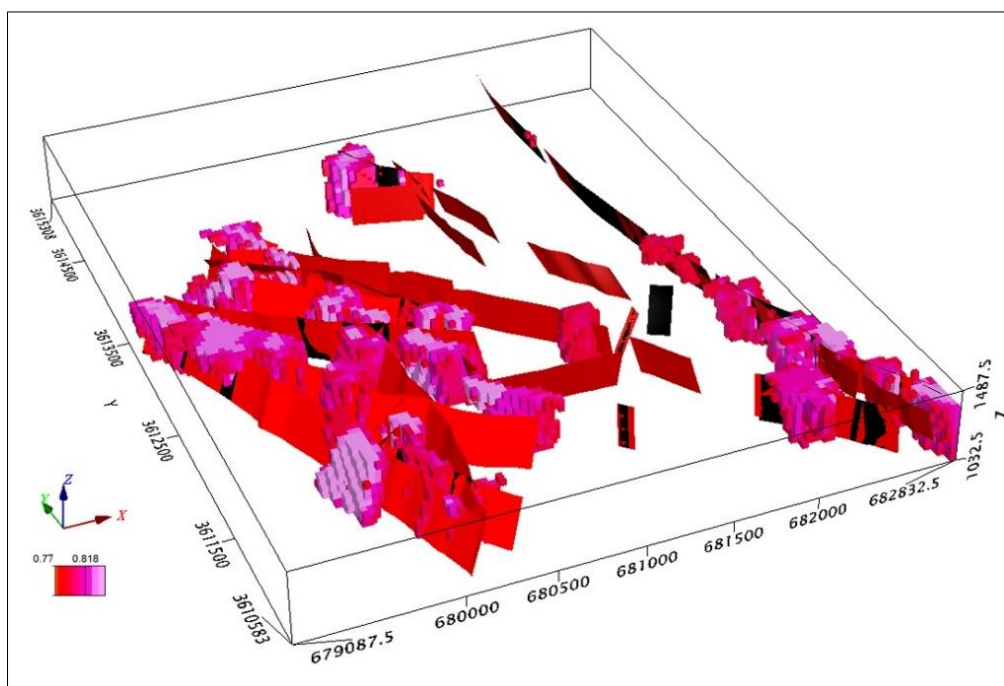
ممکن ۳۸۴,۵۸۸,۷۵۰ متر مکعب برآورد شد (شکل‌های ۱۳ و ۱۴). در نهایت، بر اساس داده‌های برداشت‌شده و مدل‌سازی‌های انجام‌شده، حجم فضاهای خالی ناشی از شکستگی‌ها برای هر سلول محاسبه شد (جدول ۲).

بر اساس مدل‌سازی انجام‌شده و تحلیل مؤلفه‌های آماری، حجم کل فضاهای باز شده در محدوده برابر ۲,۵۲۲,۲۵۰,۵۰۰ متر مکعب با میانگین (X) ۰/۶۲ و انحراف معیار (S) ۰/۱۵۴ محاسبه شد. با در نظر گرفتن مقدار X+S به عنوان حد زمینه، حجم فضاهای باز شده



شکل ۱۳. مناطق بالقوه دارای فضاهای باز در محدوده معدنی گاریجگان

Fig. 13. Potential zones containing open spaces in the Garijgan mining area



شکل ۱۴. موقعیت فضاهای باز شده ممکن به همراه موقعیت گسل‌ها (صفحه‌های قرمز رنگ) و رگه‌ها (صفحه‌های سیاه رنگ) در محدوده معدنی گاریجگان (رنگ صورتی فضاهای باز را نشان می‌دهد).

Fig. 14. The positions of the possible open spaces along with faults (red planes) and veins (black planes) locations in the Garijgan area

جدول ۲. حجم فضاهای باز حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی در محدوده گاریجگان

Table 2. The open spaces obtained from the 3D modeling in the Garijgan area

Cell	Open spaces volume (m ³)	Cell	Open spaces volume (m ³)
A	8435656	K	6334781
B	0	L	11093906
C	0	M	58470781
D	30259031	N	35446906
E	14234500	O	30945031
F	300125	P	5048531
G	0	Q	7535281
H	74163031	R	0
I	49552781	S	52768406
J	0	Total	384588750

احتمالی پر شده با سیال‌ها، می‌تواند به عنوان گام نخست در برنامه‌های اکتشافی در نظر گرفته شود تا در تلفیق با نتایج ژئوفیزیک، محل حفاری‌های عمقی و سایر عملیات اکتشافی تعیین شود.

بر اساس محاسبات انجام‌شده، حجم فضاهای باز ناشی از شکستگی‌ها تا عمق ۳۰۰ متری که می‌توانسته‌اند با سیال‌ها پر شوند، برابر با ۳۰۶,۷۸۷ متر مکعب برآورد می‌شود که معادل با ۰/۰۸ درصد از کل فضاهای باز برآورد شده در منطقه گاریجگان است (جدول ۳). این روش مدل‌سازی فضاهای باز و فضاهای

جدول ۳. نتایج نهایی مدل‌سازی سه‌بعدی در محدوده گاریجگان

Table 3. 3D modeling final results in the Garijgan area

Item	value
total volume (up to 300 meters depth)	3356888523 m ³
open spaces (resulted from fracturing up to 300 meters depth)	384588750 m ³
open spaces (resulted from fracturing)	11.46 %
open spaces filled with fluids (up to 300 meters depth)	306787 m ³
open spaces filled with fluids relative to total open spaces	0.08 %

نتیجه‌گیری

زمین‌ساختی، الگوی شکستگی‌ها و کانی‌سازی در محدوده گاریجگان است. تحلیل‌های جامع انجام‌شده با استفاده از تلفیق

نتایج این پژوهش نشان‌دهنده ارتباط معنادار بین ساختارهای

روش‌های سنجش از دور، مدل‌سازی فرکتالی، تحلیل تنش دیرین و مدل‌سازی سه‌بعدی، تصویر روشنی از فرایندهای کنترل‌کننده کانی‌سازی در این منطقه ارائه می‌دهد. بررسی‌های ساختاری نشان‌داد که این منطقه از زمان اتوسن تا کوارترنری، تحت تأثیر دو فاز تنش اصلی قرار گرفته و چرخشی در حدود ۵۵ درجه در محور σ_1 را متحمل شده است. این تغییرات تنش به تشکیل سه سامانه گسلی اصلی با راستای شمال‌غرب- جنوب‌شرق، شمال‌شرق- جنوب‌غرب و شرقی- غربی منجر شده است که سامانه اول به عنوان مهم‌ترین مجرای کانی‌سازی ایفای نقش کرده است. مدل‌سازی فرکتالی و تحلیل تراکم شکستگی‌ها نشان‌داد که مرکز محدوده با بالاترین ابعاد فرکتالی ($1/83$) بیشترین پتانسیل کانی‌سازی را دارد. این یافته با تمرکز رگه‌های ژاسپروئیدی حاوی کانی‌سازی در امتداد گسل‌های اصلی همخوانی کامل دارد. علاوه بر این، مدل‌سازی و برآوردهای کمی انجام‌شده بیانگر آن است

که $11/46$ درصد از حجم کل محدوده تا عمق ۳۰۰ متری، دارای فضاهای خالی است. از این مقدار، حدود $0/08$ درصد (معادل با $306,787$ مترمکعب) می‌توانسته توسط سیال‌ها پر شده باشد. این نتایج نه تنها درک بهتری از کنترل‌های ساختاری کانی‌سازی ارائه می‌دهد؛ بلکه می‌تواند به عنوان گام نخست در برنامه‌های اکتشافی در نظر گرفته شود تا در تلفیق با نتایج ژئوفیزیک، محل حفاری‌های عمقی و سایر عملیات اکتشافی تعیین شود.

به طور کلی، یافته‌های این پژوهش می‌تواند به عنوان الگویی برای اکتشافات معدنی در مناطق مشابه با شرایط زمین‌ساختی مشابه مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، انجام بررسی‌های تکمیلی ژئوفیزیکی و حفاری برای تأیید دقیق‌تر این مدل‌ها توصیه می‌شود.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

References

- Abdollahi Sharif, J., Imamalipour, A., Alipour, A. and Mokhtarian Asl, M., 2010. The station of modeling the mine resources in economical geology investigations and determination of mineral deposits genes & reserves. *Journal of Economic Geology*, 2(1): 51–59. (in Persian) <https://doi.org/10.22067/econg.v2i1.3685>
- Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Khakzad, A., Moarefvand, P. and Rashidnejad Omran, N., 2011. Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration–volume modeling. *Journal of Geochemical Exploration*, 108(3): 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.03.005>
- Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N. and Asadi Haroni, H., 2012. Application of power-spectrum-volume fractal method for detecting hypogene, supergene enrichment, leached and barren zones in Kahang Cu porphyry deposit, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 112: 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.08.002>
- Afzal, P., Gholami, H., Madani, N., Yasrebi, A.B. and Sadeghi, B., 2023. Mineral resource classification using geostatistical and fractal simulation in the Masjed Daghi Cu–Mo porphyry deposit, NW Iran. *Minerals*, 13(3): 370. <https://doi.org/10.3390/min13030370>
- Ahmadi, H. and Pekkan, E., 2021. Fault-based geological lineaments extraction using remote sensing and GIS- A review. *Geosciences*, 11(5): 183. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050183>
- Alinia, H., 2023. Fractal analysis of volumetric strain in brittle shear zones to estimate vein-style mineral reserves: case studies of Galle Chah-Shourab and Garijgan mineral deposits in eastern Iran. Ph.D. thesis, University of Birjand, Birjand, Iran, 230 pp. (in Persian with English abstract)
- Alinia, H., Khatib, M.M. and Zarrinkoub, M.H., 2022. The relationship between vein-style mineralization and structural evolution in Galle Chah shear zone, eastern Iran. *Tectonics Journal*, 6(21): 36–52. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22077/jt.2023.5758.1144>
- Alinia, H., Khatib, M.M. and Zarrinkoub, M.H., 2023. Study of the relationship between fracture geometry and vein-style mineralization using paleostress analysis in the Garijgan shear zone, eastern Iran. *Advanced Applied Geology*, 13(3): 624–640. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22055/aag.2022.41920.2320>
- Aliyari, F., Rastad, E. and Zengqian, H., 2007. Orogenic Gold Mineralization in the Qolqoleh Deposit, Northwestern Iran. *Resource Geology*, 57(3): 269–282. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2007.00022.x>
- Bazargani Golshan, M., Arian, M., Afzal, P., Daneshvar Saein, L. and Aleali, M., 2024. Outlining of high-quality parts of coal by concentration–volume fractal model in North Kochakali coal deposit, Central Iran. *Journal of Mining and Environment*, 15(2): 557–579. <https://doi.org/10.22044/jme.2023.13446.2482>
- Bazargani Golshan, M., Arian, M., Afzal, P., Daneshvar Saein, L. and Aleali, M., 2025. Application of fractal models for determining the relationship between REEs and faults in North Kochakali coal deposit, Central Iran. *Scientific Reports*, 15: 1276. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85795-5>
- 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(12): 775. <https://doi.org/10.3390/min9120775>
- 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(4): 573–577. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2012.01.022>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0811-7>
- Gholamzadeh, M., Rahimi, B., Ghaemi, F. and Ahmadi Rohani, R., 2015. Investigation of faults and fractures in Akhlamad (north west Binaloud) based on the satellite data processing and studying fractal characteristics of fracture systems *Tectonics Journal*, 1(2): 77–92. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22077/jt.2015.286>
- Jentzer, M., Fournier, M., Agard, Ph., Omrani, J., Khatib M.M. and Whitechurch, H., 2017.

- Neogene to Present paleostress field in Eastern Iran (Sistan belt) and implications for regional geodynamics. *Tectonics*, 36(2): 287–303. <https://doi.org/10.1002/2016TC004275>
- Jin, X., Wang, G., Tang, P., Hu, Ch., Liu, Y. and Zhang, S., 2020. 3D geological modelling and uncertainty analysis for 3D targeting in Shanggong gold deposit (China). *Journal of Geochemical Exploration*, 210: 106442. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106442>
- Karaman, M., Kumral, Yildirim, M.D., Doner, K.Z., Afzal, P. and Abdelnasser, A., 2021. Delineation of the porphyry-skarn mineralized zones (NW Turkey) using concentration–volume fractal model. *Geochemistry*, 81(4): 125802. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2021.125802>
- 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. *Geopersia*, 1(1): 19–54. <https://doi.org/10.22059/jgeo.2011.22162>
- Kavyani Sadr, Kh., Rahimi, B. and Khatib, M.M., 2022a. Investigating the relationship between the dimension of the Riedel fault blocks and number of open spaces in brittle shear zones: analogue and numerical modeling *Tectonics Journal*, 5(17): 57–74. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22077/jt.2021.4452.1115>
- Kavyani-Sadr, Kh., Rahimi B., Khatib, M.M. and Kim, Y-S., 2022b. Assessment of open spaces related to Riedel-shears dip effect in brittle shear zones. *Journal of Structural Geology*, 154: 104486. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104486>
- Kemp, E.A., 2007. 3D geological modeling supporting mineral exploration. In: W.D. 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, pp. 1051–1061. Retrieved May 19, 2025 from https://www.researchgate.net/publication/362312931_3-D_geological_modelling_supporting_mineral_exploration
- Khatib, M.M., Sadeghi Farshbaf, P., Zarrinkoub, M.H. and Gholami, E., 2019. Structural controlling in the formation of vein-style mines in eastern Iran. *Proceedings of the 8th Iranian Mining Engineering Conference*, University of Birjand, Birjand, Iran.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.06.001>
- Liu, Zh., Guo, Zh., Wang, J., Wang, R., Shan, W., Zhong, H., Chen, Y., Chen, Y., 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(18): 10277. <https://doi.org/10.3390/app131810277>
- Madondo, J., Canet, C., Nuñez-Useche, F. and Gonzalez-Partida, E., 2021. Geology and geochemistry of jasperoids from the ‘Montaña de Manganeso’ district, San Luis Potosí, north-central Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 38 (3): 193–209. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2021.3.1651>
- 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(3): 233. <https://doi.org/10.3390/min10030233>
- 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(9): 1174. <https://doi.org/10.3390/min12091174>
- Paravarzar, S., Mokhtari, Z., Afzal, P. and Aliyari, F., 2023. Application of an approximate geostatistical simulation algorithm to delineate the gold mineralized zones characterized by fractal methodology. *Journal of African Earth Sciences*, 200: 104865. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.104865>
- Sun, T. and Liangming, L., 2014. Delineating the complexity of Cu–Mo mineralization in a porphyry intrusion by computational and fractal modeling: A case study of the Chehugou deposit

- in the Chifeng district, Inner Mongolia, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 144 (Part A): 128–143.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.02.015>
- Vahdati Daneshmand, F. and Kholghi, M.H., 1987. Geological map of Khouf (scale: 1:100000). Geological Survey and Mineral Exploration of Iran.
- Wang, G. and Huang, L., 2012. 3D geological modeling for mineral resource assessment of the Tongshan Cu deposit, Heilongjiang Province, China. *Geoscience Frontiers*, 3(4): 483–491.
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.12.012>
- 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): 49–69.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.09.003>