فصلنامه زمین ساخت
بهار ۱۳۹۹ ، سال چهارم ، شماره ۱۳

منطق فازی و زاویه سنجی به‌عنوان ابزارهایی در معنادار کردن داده‌های ورودی در مدلسازی رگه‌های معدنی: مطالعه‌ی موردی از معدن کوه سفید، خراسان جنوبی

پویا صادقی فرشباف [۱و*]، محمد مهدی خطیب [۲]، محمد حسین زرین کوب [۳]، ابراهیم غلامی [۴]

۱ - گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، پژوهشگر پسادکتری
۲ - گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند
۳ - گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند
۴ - گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۰

چکیده

شناسایی رگه‌های معدنی با داده‌های کم، با توجه به اهمیت معادن رگه ای در اقتصاد کشور، یکی از محورهای اصلی در بحث اکتشاف است. در گستره‌ی خاوری ایران بیشترین ذخایر منیزیتی کشف شده دارای ساختار رگه‌ای هستند که در مسیر پهنه‌ی برشی گسل‌های امتداد لغز واقع شده‌اند. در حال حاضر برداشت این ماده‌ی معدنی فقط به رخنمون رگه‌ها در سطح زمین محدود می‌شود. درصورت تمام شدن ذخایر سطحی تامین نیاز به این ماده‌ی اولیه معدنی صرفا در سایه‌ی تخمین زیرسطحی ممکن خواهد شد. این تحقیق با هدف ارزیابی گسترش عمقی منیزیت در محدوده‌ی معدنی کوه (حوض) سفید بیرجند با توجه به هندسه‌ی رگه‌های معدنی در کنگلومرای چین خورده‌ی نئوژن بر اساس ترکیب روش‌های پیشنهادی شامل تحلیل آماری زاویه‌های عناصر ساختاری و منطق فازی برای ایجاد پایگاه داده‌ای معنا دار قبل از ورود داده‌ها به نرم افزارهای مدلسازی (DataMine، UDEC، Surpac و PC-Mine) معدنی انجام شده است. در این روش، ابتدا تمام زاویه‌های بین امتدادهای ساختاری بر اساس تقاطع آنها دو به دو وزن‌دهی می‌شوند. سپس نقشه‌ی همبستگی زاویه‌ها تعیین و با مدل‌های ریدل، آنتی ریدل مطابقت داده می‌شوند. برای ایجاد مدل‌های بهتر همبستگی بخصوص در جمعیت‌های آماری محدودتر، از منطق فازی بهره گرفته می‌شود. ارزیابی میدانی در مناطق خاوری معدن که کمترین داده‌های خام در دسترس است، تایید کننده‌ی نقاط امید بخش اولیه‌ی بدست آمده از این روش است. بنابراین از این روش‌ها می‌توان به عنوان ابزاری در تبدیل داده‌های خام به معنادار قبل از ورود آنها به محیط‌های نرم افزاری استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: منطق فازی، زاویه سنجی، رگه معدنی، مدلسازی

* نویسنده مسئول: pouya.sadeghi@rocketmail.com

Fuzzy logic and goniometry as tools for improving the meaning of input data in modeling of mineral veins: a case study from the Kuh-e-Sefid mine, Eastern Iran

Sadeghi-Farshabaf .P [1,*]; Khatib .M.M [2]; ZarrinKub .M.H [3]; Gholami .E [4]

1- Department of Geology, University of Birjand, Postdoctoral Researcher
2- Department of Geology, University of Birjand
3- Department of Geology, University of Birjand
4- Department of Geology, University of Birjand

Abstract

Identification of mineral veins that do not have much data available, due to the importance of vein mines in the economy of the country, is one of the main issues in the explorations. In the eastern region of Iran, the largest magnesite deposits discovered are vein structures located along the strike-slip shear zones. At present, mining of this mineral is confined to the outcrops of veins at the surface. If surface reserves are exhausted, the need for this mineral will only be met by subsurface estimates. This study aimed to evaluate the deep magnesium expansion in the Kuh-e-Sefid mine concerning the geometry of the mineral veins in the Neogene folded conglomerate based on a combination of proposed methods including statistical analysis of the angles related to the intersection of structural elements and fuzzy logic to create a meaningful database before entering data into mineral modeling software. In this method, first all the angles between the structural strikes are weighted two by two based on their intersection. Then, the correlation map of the angles is determined and matched with the shear fractures of the Riedel model. Fuzzy logic is used to create better correlation models, especially in the narrower statistical populations. Field evaluation in the easternmost areas of the mine with the least raw data available confirms the early promising points obtained by this method. Therefore, using these two computational tools, one can convert meaningful data before entering raw data into modeling environments.

Keywords: Mineral vein, Fuzzy logic, Goniometry, Meaningful data, Modeling

مقدمه

ذخایر کانسارهای رگه ای به صورت رگه -رگچه‌ای در پهنه‌های گسلی، برشی و همچنین شکستگی‌های موجود در توده سنگ‌های میزبان، شامل هر سه گروه آذرین، رسوبی و دگرگونی، تشکیل می شوند. در ایران، این نوع معادن در مناطق گوناگون و از دیدگاه‌های متنوعی بررسی شده‌اند که از آن‌جمله می توان به ژنز نهشته‌های منیزیت-آپاتیت در جنوب خاوری زنجان (عزیزی و همکاران، ۲۰۰۹)؛ مدلسازی فرکتال در نهشته‌های رگه ای (دارابی و هزارخانی، ۲۰۰۸)، اکتشاف رگه‌های مس در جبال بارز (محمودی و همکاران، ۲۰۱۳)؛ تکامل تکتونیکی در کمربند ولکانیکی اهر- اسباران (جمالی و همکاران، ۲۰۱۰)؛ مدل فرکتال حجمی در نهشته‌های طلا (افضل، ۲۰۱۳) و تنوع سیالات معدنی در جایگیری نهشت فلوریت رگه ای (احیا، ۲۰۱۲) اشاره نمود.

هرچند تعداد محدودی از معادن منیزیت ایران به صورت توده ای وجود دارند، اما بیشترین نهشته‌های منیزیت در کشور، به ویژه در گستره‌ی خاوری آن، بصورت سیستم‌های رگه ای شناسایی شده‌اند. با توجه به نیاز روزافزون کشور به منیزیت و قیمت آن در بازار جهانی و به دلیل موارد متعدد مصرف منیزیت از جمله بعنوان ماده نسوز در صنایعی مانند آهن و فولاد، شیشه، سرامیک، سیمان و متداولترین فراورده این ماده معدنی یعنی آجرهای نسوز، این مطالعه، با هدف ارائه‌ی سازوکاری در پردازش داده‌های خام به منظور افزایش ضریب اطمینان مدل‌های معدنی، به بررسی رگه‌های منیزیت خاور ایران به‌عنوان یک مثال موردی در صحت سنجی این روش‌ها می پردازد. نهشته‌های منیزیت در طبیعت به صورتهای مختلف توده ای، گل کلمی، رگه ای، بلورین و باندی یافت می شوند. در گستره‌ی خاور ایران بیشترین ذخایر منیزیتی کشف شده دارای ساختار رگه ای هستند که در مسیر پهنه‌ی برشی گسل‌های امتداد لغز واقع شده‌اند. در حال حاضر برداشت این ماده معدنی فقط به رخنمون رگه‌ها در سطح زمین محدود می شود. بنابراین درصورت تمام شدن ذخایر سطحی نیاز به این راهکارهایی برای تامین ماده اولیه معدنی محسوس خواهد شد.

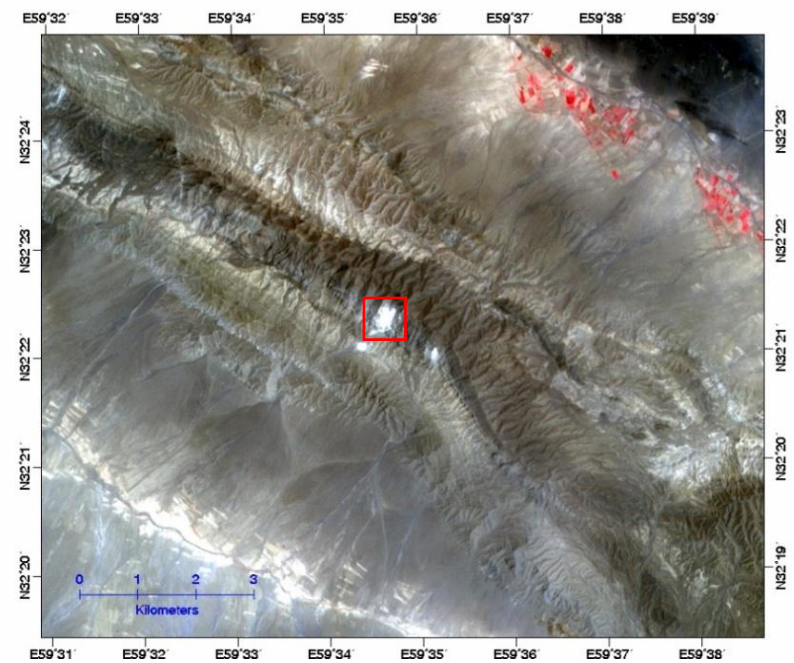
معدن کوه سفید در جنوب باختری بیرجند یکی از معادن مهم تامین منیزیت است که در آن ماده معدنی بصورت ساختارهای رگه ای قابل مشاهده است. این رگه‌ها در ارتباط با عملکرد پهنه‌ی برشی راستگرد تشکیل شده‌اند. به عقیده‌ی سیلوستر (۱۹۸۸)، در مسیر پهنه‌های برشی با پیدایش فضاهای باز شرایطی مناسب در خصوص نهشته‌های محلول‌های کانه دار فراهم می شود. او معتقد است، در مسیر پهنه‌های برشی، با پیدایش فضاهای باز شرایطی مناسب در خصوص نهشته‌های محلول‌های کانه دار فراهم می شود. خطیب و زرین کوب (۱۳۹۱) رگه‌های معدنی در خاور ایران را ناپیوسته می دانند که با هندسه‌ی معینی در فضاهای کششی جای گرفته‌اند. بنابراین بر اساس کنترل ساختاری رگه‌ها مطالعات مختلفی در خصوص تحلیل ساختاری رگه های منیزیت جهت اکتشاف کانسارهای کرومیت (حسین آبادی و همکاران، ۱۳۹۳)، نقش عناصر ساختاری و پترولوژیکی در کانی زایی منیزیت (عبادتی و همکاران، ۲۰۱۴) و نقش مولفه های تکتونیکی و ساختاری در پیدایش نهشته‌های منیزیتی (تیبور و همکاران، ۲۰۱۰) انجام شده است. مطالعات ساختاری به همراه مطالعات دیگر از جمله بررسی توزیع فضایی متغیرهای کنترل کننده‌ی MgO (مانند کندلا و همکاران، ۲۰۱۷) می تواند مکمل مناسبی جهت نتیجه گیری‌ها باشد. مطالعات ژئوشیمیایی سیال‌های کانی دار نیز در منیزیت‌های مرتبط با اولترامافیک‌ها (مانند کهیا و کوشجو، ۲۰۱۴) و مدل‌های ژنتیکی برای کانی شناسی و زمین شناسی (مانند زرین کوب و همکاران، ۱۳۸۴) نیز نقش تعیین کننده در منیزیت‌های خاور ایران دارند. فرارو (۲۰۱۳) رابطه‌ی بین

دگرشکلی و رگه‌های مزوترمال را بررسی کرد. او نتیجه گرفت که جابجایی رگه‌ها و کانی سازی، با جابجایی شیب لغز روی گسلهایی که میزبان رگه‌های پرشده هستند همراه است.

آنچه در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است، ارزیابی گسترش عمقی منیزیت در محدوده‌ی معدنی کوه سفید بیرجند با توجه به هندسه‌ی رگه‌های معدنی در کنگلومرای چین خورده نئوژن است که بر اساس ترکیب دو روش پیشنهادی در قالب یک ابزار شناسایی شامل تحلیل آماری زاویه‌های عناصر ساختاری و منطق فازی عمل می کند. هدف از بکارگیری این ابزار، ایجاد پایگاه داده ای معنا دار قبل از ورود داده‌ها به نرم افزارهای مدلسازی معدنی یا هر سازوکار دیگر مدلسازی است. به این ترتیب، برخلاف روش‌های سنتی که داده‌های اندازه گیری شده مستقیماً وارد تحلیل می‌شوند، در این سازوکار، ابتدا داده‌ها پردازش و معنادار شده‌اند و سپس در تحلیل نهایی مورد استفاده قرار می گیرند.

محدوده‌ی مورد مطالعه

معدن کوه سفید در فاصله حدود ۱۳۵ کیلومتری جنوب باختری بیرجند با موقعیت جغرافیایی E59:35.28 و N32:21.92 قرار دارد (شکل ۱). در گستره‌ی معدن در محدوده‌ای به طول ۳ کیلومتر و عرض ۲ کیلومتر آثار رگه-های منیزیت دیده می‌شود. این رگه‌ها در کنگلومرای چین خورده نئوژن در فضای باز ناشی از عملکرد یک پهنه برشی راستگرد با روند کلی N125 تشکیل شده‌اند. سنگ در برگیرنده‌ی رگه‌های منیزیت در کوه سفید رفتار شکننده داشته و بنابراین فرآیند تشکیل بودین دیده نمی شود. در این محدوده عموما شکل رگه‌های منیزیت بصورت دوکی شکل، بلوکهای رمبوئدری و هرمی شکل است. ضمن اینکه رگه‌های بزرگتر دارای روندهای طولانی خطی هستند که در فواصلی توسط گسل‌های عرضی جابجا شده‌اند.



شکل . ۱: تصویر ماهواره ای ASTER از موقعیت معدن کوه سفید (کادر قرمز) در کنگلومراهای نئوژن

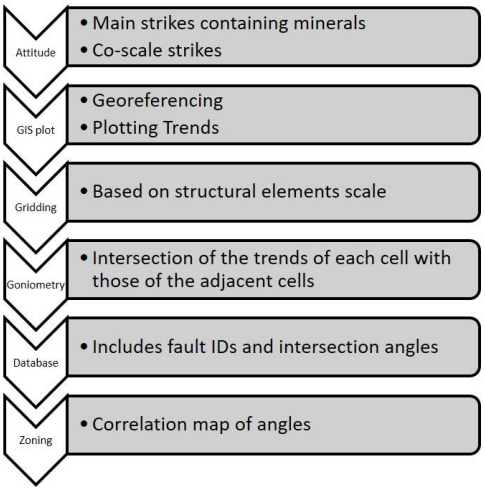
مواد و روش‌ها

روش شـــناختی مورد بحث در این مطالعه، شـــامل دو تحلیل مجزا و به موازات یکدیگر اســـت که بســـته به نوع معادن می‌توان از یکی از آنها و یا در صورت مساعد بودن زمینه‌ی داده های موجود، از هر دو نوع تحلیل در قالب یک ابزار شنا سایی ا ستفاده نمود. دو تحلیل نامبرده شامل زاویه ســـنجی بین روند و امتدادهای ســـاختاری کانه زا به روش مدل‌های درونیابی و منطق فازی برای تمام داده‌های جهت‌دار اســـت. رویکرد اول، برای معادن با داده های ساختاری کافی و رویکرد دوم بیشتر در موارد کمبود داده مناسب هستند. از آنجا که در تحلیل زاویه سنجی، داده‌های معنادار جمعیت کمتری نســـبت به داده های خام دارند، بدیهی است که صرفا استفاده از آن در گستره‌های معدنی با کمبود داده منطقی به‌نظر نمی‌رسد و ترکیب آن با روش دوم، یعنی منطق فازی، ابزار مناسبی خواهد بود.

زاویه سنجی

از آنجا که معادن رگه ای، تحت کنترل ســـیســـتم‌های گســـل و شـــکســـتگی منطقه هســـتند، هدف از تحلیل زاویه سنجی، رسیدن به یک بازه‌ی زاویه‌ای غالب بین امتدادهای ســـاختاری کنترل کننده‌ی ماده‌ی معدنی و مطابقت آن با الگوی محلی برش ریدل (۱۹۲۹) اســـت. با مشـــخص شـــدن این الگو، می‌توان جهت‌گیری فضـــا های باز محتمل و مســـاعد برای نهشـــت ماده‌ی معدنی را تقریب زد. همچنین، عناصر ساختاری مرتبط با فراوانترین بازه‌ی زاویه‌ای، دارای بیشـــترین وزن داده‌های ورودی به نرم افزارها خواهند بود. فرآیند کلی این روش در نمودار شـــکل ۲ نشـــان داده شـــده اســـت. همانگونه که در این نمودار مشـــخص اســـت، ابتدا امتداد تمام عنا صر ساختاری حاوی ماده‌ی معدنی و سپس عناصـــر ســـاختاری هم مقیاس با آنها به صـــورت خطوط روندی در محیط GIS پلات شـــده‌اند. ســـپس متناســـب با دقـت کـار و داده‌هـای موجود (مـدل ارتفـاعی رقومی)، چهارگوش مطالعاتی شبکه بندی می‌شود. امتداد ساختاری اندازه‌گیری شـــده در هر شـــبکه (حاصـــل از پیمایش صحرایی) با امتدادهای دیگر در همان شبکه و ۸ شبکه‌ی پیرامون آن تلاقی داده شده‌اند. با تهیه‌ی یک پایگاه داده‌ای شـــامل اســـم (ID) امتدادها در دو ســـتون مجرا و زاویه‌ی تلاقی بین دو ID در ســـتونی دیگر، مرحله‌ی بازه بندی زاویه‌ها بر اســـاس فراوانی آنها در آن بازه و ایجاد نقشـــه (های) همبســـتگی زوایه ها (شـــکل ۳) برای چهارگوش مطالعاتی انجام می‌شود.

اکنون برای هر شبکه، الگوی شکستگی ریدل متناسب با فراوانترین بازه‌ی زاویه‌ی موجود منطبق می شود و در پی آن، برای هر شبکه دو ID اصلی R و R' مرتبط با آن زاویه انتخاب شـــده‌اند زیرا فضـــاهای باز (کشـــشـــی) مرتبط با چرخش بلوک‌ها توسط این دو شکستگی محدود می‌شوند (خطیب، ۹۱). بر اساس جمعیت آماری تمام شکستگی‌های اندازه گیری شده، برای بدست آوردن تنش بیشینه‌ی منطقه و مطابقت آن با الگوی شـکسـتگی‌های ریدل، همبسـتگی زاویه‌ها با توجه به مناطق کششی محتمل پهنه بندی شده‌اند. با توجه به در نظر گرفتن موقعیت شـکسـتگی‌های R و R'، بالاترین همبســـتگی برای زاویه های ۶۰ و ۱۲۰ درجه (با مقدار خطای مجاز ۱۰ درجه) خواهد بود. توجه شـــود که ممکن اســـت در یک محدوده مطالعاتی، الگوی غالب ریدل ترکیب دیگری از R, R′, P, T باشـــد که در این صـــورت، همبســـتگی برای زاویه‌های مرتبط با آنها منظور خواهد شد.



شکل . ۲: فرآیند کلی ایجاد مدل همبستگی بر اساس زوایه سنجی

به این ترتیب، داده‌های موجود بر اساس زاویه سنجی انجام شده پایش و معنادار شده‌اند. این داده‌ها، بعنوان ورودی‌های اصلی به محیط‌های مدلساز، مانند سورپک (Surpac)، درنظر گرفته می‌شوند.

منطق فازی

دیدگاه فازی در تحلیل همبستگی زاویه‌ها و فاصله‌های اندازه گیری، یک ابزار مهم در تحلیل و شناخت طرح ساختاری مبهم در چهارگوش مطالعاتی است.

معدن رگه ای کوه سفید، درجه خلوص منیزیت بالایی (۹۶٪) را در بین نهشته های منیزیتی خاور ایران دارد. با پیمایش در امتداد رگه‌ها، تغییرات تدریجی آشکاری در کاهش ضخامت رگه‌ها دیده می شود. به نظر می رسد ارتباط موقعیت هندسی رگه‌ها و عناصر ساختاری (گسل‌ها و درزه‌ها) از شرایط منظم‌تر و سیستماتیکی نسبت به معادنی که سنگ میزبان شکل پذیر دارند برخوردار است و شاید بتوان این ارتباط را توسط روش‌های هندسی پیگیری نمود. بیش از ۱۰۰ برداشت هندسی از رگه‌های منیزیتی، صفحات گسله، ضخامت رگه‌ها و بردارهای لغزشی بر روی گسل‌ها انجام شده است. معدن کوه سفید و محدوده‌ی پیرامون آن به‌لحاظ زمین شناسی و ساختاری در قالب ایستگاه‌های گسترده و فراگیر مورد مطالعه و برداشت قرار گرفتند. لزوم وجود شبکه‌ی ارتفاعی برای تحلیل فضایی و سه بعدی داده‌ها بدلیل برداشت داده‌ها در ارتفاعات مختلف و ارتباط بیرونزدگی رگه‌ها با توپوگرافی بسیار اهمیت دارد. ایجاد شبکه‌ی ارتفاعی منطقه‌ی مورد مطالعه با استفاده از داده‌های ارتفاعی GPS در شبکه‌ی مسیر های پیمایش و داده های مکمل رقومی ارتفاعی، مرحله‌ی نهایی تحلیل را تشکیل می‌دهند. مشخص‌سازی روندهای ساختاری و کانی‌زایی برای تعیین جهت گیری های ساختاری توسط پایگاه اطلاعات جداول برداشت میدانی (برای امتداد، شیب، راستا و میل) تعریف شده‌اند و سپس نسبت به یکدیگر بر اساس پایگاه اطلاعات جداول برداشت میدانی (برای سازوکار گسل و ریک) بر اساس منطق فازی مقادیر و فاصله‌ها آرایش یافته‌اند. در نهایت، پس از تشکیل طرح ساختاری، زوایای تمام اجزای ساختاری نسبت به یکدیگر و سطح توپوگرافی اندازه‌گیری می‌شوند تا مدل حجمی و توزیع کانسارزایی در الگوی سه بعدی ایجاد شود.

در شبکه‌ی پهنه بندی شده، سلول‌هایی که دارای کمبود اطلاعات ساختاری (یعنی یک امتداد اصلی ساختاری) هستند، به تنهایی قابل استفاده در مدلسازی رگه‌ها نیستند. فازی سازی این سلول‌ها با تعریف متغیرها، توابع عضویت و توابع کنترل (قوانین) مناسب می‌تواند ارزش ساختاری آنها را در ارتباط با سلول‌های مجاور مشخص کند و نیز موقعیت و قابل استفاده بودن آنها را از نظر دارا بودن اطلاعات مفید در مدلسازی مشخص نماید. با هدف ساده‌سازی در روش پیشنهادی، تعداد متغیرهای محدودی در این مطالعه بررسی شده‌اند. هرچند می‌توان هر تعداد متغیر لازم را براساس محدوده‌ی مورد مطالعه و پایگاه داده‌ای از قبل موجود تعریف نمود. همچنین با توجه

به اکتشـــافات گذشـــته و اطلاعات دریافتی از گمانه‌های قبلی، داده‌هـای زئوفیزیـک و هرگونـه عملیـات تکمیلی دیگر، می‌توان توابع کنترل را به صـــورت بهینه‌تر تعریف نمود.

تـابع هـدف فـازی همچون محـدودیـت‌هـا بـا تـابع عضـویت مشـخص می‌شـود. از آنجاکه بهینه‌سـازی تابع هدف مورد بحث می‌باشـــد، در محیط فازی می‌توان یک تصـــمیم را مشـــابه محیط غیرفازی به عنوان مجموعه‌ای از فعالیت‌ها که به طور همزمان تابع هدف و محدودیت‌ها را بهینه می‌نماید در نظر گرفت. به عبارتی دیگر، می‌توان تصمیم در محیط فازی را به عنوان اشتراک محدودیت‌های فازی و تابع (توابع) هدف فازی در نظر گرفت.

با درنظر گرفتن یک مجموعه‌ی فازی به صورت:

$$A = \sum \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \mid x_i \in X \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن μ_A تابع عضـــویت و x_i یک عضـــو ویژه از دامنه‌ی X اســـت، می توان مجموعه‌ی فازی پیوســـته را به صورت زیر تعریف کرد:

$$A = \int_x \mu_A \frac{(x)}{x} \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

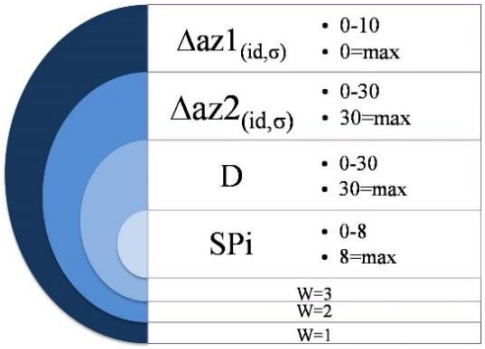
متغیرهای اصـــلی برای تعریف توابع عضـــویت در این پژوهش در نمودار وزنی شـــکل ۳ نشـــان داده شـــده‌اند. از چهار متغیر اصلی ارائه شده، دو متغیر مرتبط با زاویه سنجی هســـتند که در تابع کنترل دارای بیشـــترین وزن‌های فازی هستند. پس از آنها، پارامترهای ضخامت و تعداد سلول‌های (پیکسل‌ها) مجاور با همبستگی بالا، متغیرهای وزنی بعدی را در مدل فازی تشـــکیل می‌دهند. شـــکل ۳ نمودار وزنی متغیرهای اصـــلی برای تعریف توابع عضـــویت را نشـــان می‌دهد. برای مثال، تابع عضویت برای دو متغیر با بیشترین وزن در شکل ۳ در ارتباط با بیشترین تطابق به صورت زیر تعریف شده است:

$$X_{w=1} = \{0,1,...,10\} \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

$$\mu_{w=1}(x) = \begin{cases} 1 & x < 3 \\ 0.5 & 3 \le x \le 6 \\ 0 & x > 6 \end{cases} \qquad \text{(رابطه ۴)}$$

$$X_{w=2} = \{0,1,...,30\} \qquad \text{(رابطه ۵)}$$

$$\mu_{w=2}(x) = \begin{cases} 0 & x < 10 \\ 0.5 & 10 \le x \le 20 \\ 1 & x > 20 \end{cases} \qquad \text{(رابطه ۶)}$$



شکل . ۳: نمودار وزنی نشان دهنده‌ی متغیرهای اصلی برای تعریف توابع عضویت.
w، نشان دهنده‌ی وزن فازی است.
$\Delta az1_{(id,\sigma)}$ متغیر اول اختلاف آزیموت گسل (و شکستگی) با جهت بیشینه تنش (جهت شکستگی T در مدل ریدل)
$\Delta az2_{(id,\sigma)}$ متغیر دوم اختلاف آزیموت گسل (و شکستگی) با جهت بیشینه تنش (جهت شکستگی T در مدل ریدل)
D متغیر ضخامت رگه و SPi متغیر سلول‌های مجاور با همبستگی بالا است.

بحث

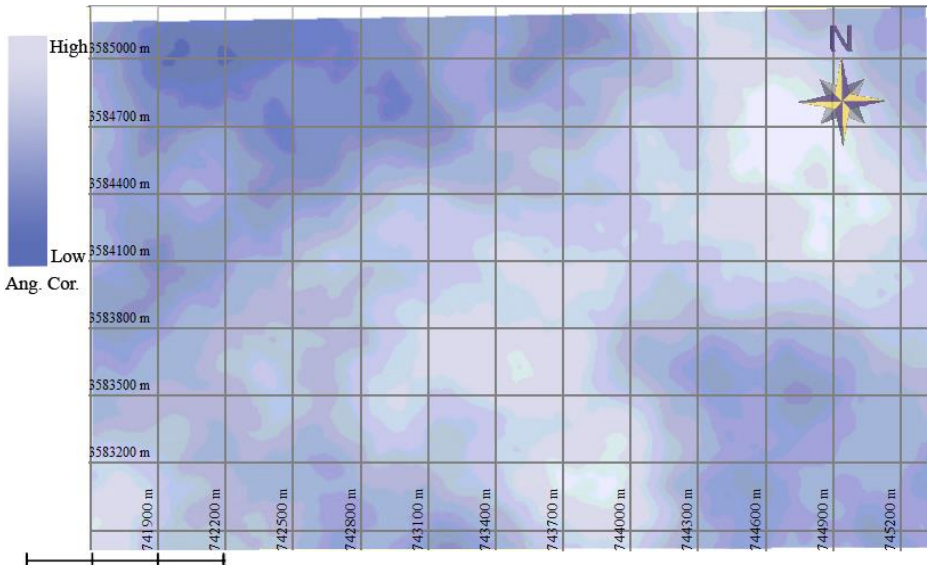
هندسه رگه‌ها در شمال باختری محدوده با ضخامتی بالغ بر ۲۰ سانتی متر در موقعیت هندسی 035/60 توسط گسل‌های نرمال کنترل می‌شوند (شکل ۴). با پیمایش به سمت انتهای شمال باختری، شواهدی از رگه‌هایی با هندسه متفاوت و امتداد خاوری- باختری با شیب حدود ۳۰ درجه به سمت جنوب وجود دارد. این رگه‌ها علیرغم شیب کم، در یک سازوکار نرمال شکل گرفته‌اند و کنترل کننده شکستگی‌های منشعب از آن هستند که در تشکیل رگچه‌های این محدوده نقش اساسی دارند. در بخش شمالی معدن، رگه‌های ماده معدنی تحت کنترل ساختاری باز شدگی‌های مرتبط با شکستگی‌های با موقعیت فضایی 170/20 قرار دارند. ضخامت رگه‌ها در این سیستم حدود ۱۰ سانتی متر می‌باشد (شکل ۵). از مهمترین سیستم‌های گسلی کنترل کننده ماده معدنی در بخش شمالی معدن، به گسل‌های با موقعیت هندسی 173/30 می توان اشاره نمود که رگه‌های ماده معدنی با ضخامت بالغ بر ۴ متر را در فضای ایجاد شده توسط عملکرد گسل نرمال با مولفه راستالغز راست بر جای داده است. کنترل ساختاری ماده معدنی در شمال خاوری به گونه ای متفاوت از شمال باختری، در ارتباط با رگه‌هایی با موقعیت هندسی 340/55 می‌باشد. این رگه‌های سیلیسی کربناتی واقع در حد شمال خاوری کنگلومراهای نئوژن هستند که با ادامه به سمت شمال خاوری، از ضخامت آنها کاسته می شود. علت این کاهش ضخامت، تغییر لیتولوژی از کنگلومرا به مارن می‌باشد. در بخش مرکزی معدن، رگه‌های منیزیت واقع در لایه‌های ماسه سنگی به ضخامت cm ۱۵-۸ توسط گسل‌های معکوس با هندسه 053/38 کنترل می‌شوند. همچنین، گسل‌های نرمال با مولفه راستالغز راست‌بر با هندسه 115/65، رگه‌های به ضخامت ۲۰ سانتی متر را کنترل می‌کنند (شکل ۶). همچنین حد خاوری بخش مرکزی معدن اصلی توسط گسل راست بر با موقعیت هندسی 110/85 به ظاهر محدود می شود. این گسل خود توسط گسل‌های نرمال خاوری-باختری جابجایی نشان می‌دهد. شواهد پیگیری ماده معدنی در خاوری ترین بخش‌های معدن (حدود ۲ کیلومتری معدن فعال) مربوط هستند به رگه‌های کربناتی نئوژن که توسط شکستگی‌هایی با موقعیت هندسی 236/60 کنترل می‌شوند.

شکل . ۴: رگه تحت کنترل ساختاری گسل نرمال در موقعیت ۳۵۸۳۸۲۲-۷۴۳۰۹۵ و ارتفاع ۱۹۷۴ متر در شمال باختر محدوده با ضخامت حدود ۲۰ سانتی متر و موقعیت هندسی 035/60

شکل . ۵: رگه‌های منیزیت در بخش شمالی معدن با موقعیت ۳۵۸۳۸۹۷-۷۴۳۳۹۷ در ارتفاع ۲۰۹۴ متری و موقعیت هندسی 170/20 (دید شمال باختری)

پس از مرحله‌ی برداشت‌های هندسی ساختاری و ایجاد پایگاه اطلاعات، متناسب با دقت کار و داده‌های موجود (مدل ارتفاعی رقومی)، چهارگوش مطالعاتی شبکه بندی می شود. سپس داده‌های موجود بر اساس توضیحات فرآیند کلی ایجاد مدل همبستگی بر اساس شبکه بندی و زوایه سنجی (شکل ۲) پایش و معنادار شده‌اند که نتیجه بصورت پهنه بندی نمایش داده شده است (شکل ۷).

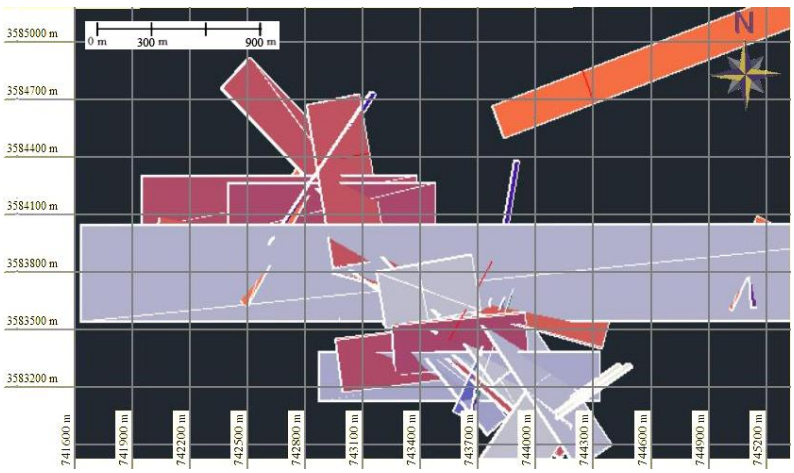
شکل . ۶: رگه‌های منیزیت در بخش مرکزی معدن با موقعیت ۳۵۸۳۴۲۰-۷۴۳۷۰۰ در ارتفاع ۱۸۹۶ متری و موقعیت هندسی 115/65 و زاویه ریک R=85SW (دید خاوری)



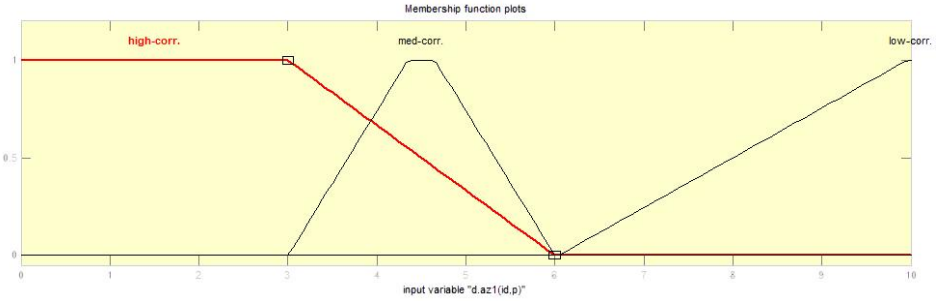
شکل . ۷: نقشه‌ی همبستگی زوایه‌ها (شکل ۲) برای چهارگوش مطالعاتی بر اساس فرآیند شکل ۲

بر اساس توضیح فرآیند معرفی شده در بخش روش‌شناختی برای ایجاد مدل همبستگی، زاویه سنجی و تشکیل پایگاه داده‌ی گسل، دیگر مراحل لازم برای ایجاد طرح ساختاری مبنی بر زاویه‌سنجی می باشند. شکل ۸ نمونه توزیع ماده معدنی را بر اساس زاویه سنجی نشان می‌دهد. ابزار دیگر در این تحلیل، منطق فازی است. استفاده از نرم افزارهای مختلف در این رابطه آنچنان مهم نیست و آنچه که مدنظر می‌باشد ترتیب روش‌ها یعنی ابتدا برداشت ساختاری و سپس چیدمان آن بر اساس عضویت‌های فازی برای مقادیر کمی (امتداد و شیب) و فاصله‌ها (بین ایستگاه-های اندازه گیری) می‌باشد.

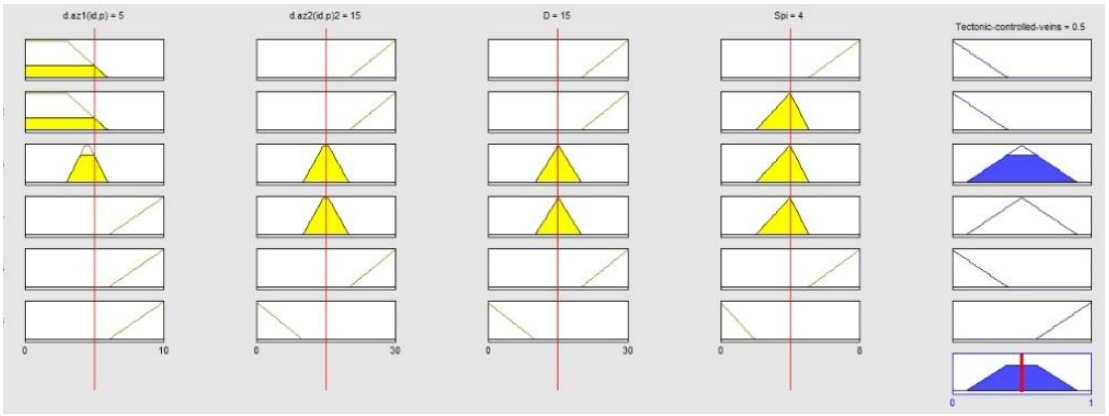
در گام بعدی، متغیرهای اصلی برای توابع عضویت مطابق با شکل ۳ شامل $\Delta az1_{(id,\sigma)}$، $\Delta az2_{(id,\sigma)}$، D و SPi تعریف و اعمال وزن شده‌اند. شکل ۹ نمودار تابع عضویت مربوط به رابطه‌ی (۴) را نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۱۰ وضعیت متغیرها در سیستم شرطی فازی را نشان می‌دهد.



شکل . ۸: توزیع ماده‌ی معدنی بر اساس پهنه بندی زاویه سنجی
(آبی: کنترل ساختاری رگه‌های منیزیت، قرمز و نارنجی: به ترتیب شکستگی‌های بدون کانی و کم کانی)



شکل . ۹: نمودار بیشترین وزن عضویت (خط قرمز) برای بالاترین انطباق در متغیر $\Delta az1_{(id,\sigma)}$



شکل . ۱۰: وضعیت متغیرها در سیستم شرطی فازی (زرد) و خروجی غیرفازی کنترل تکتونیکی رگه‌ها (آبی)

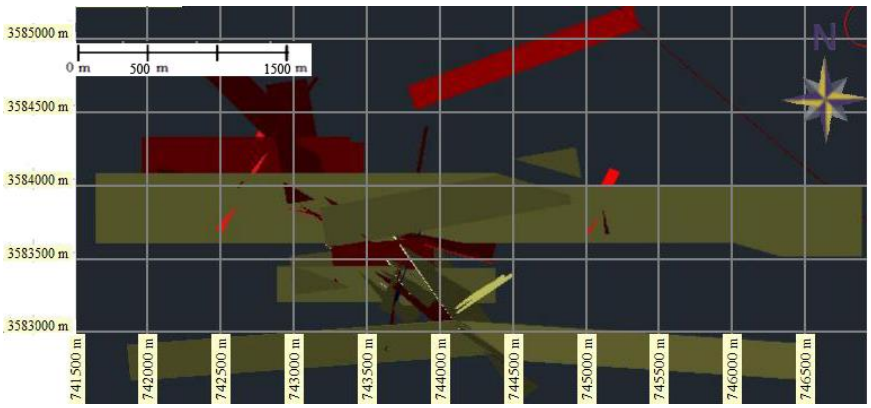
شواهد ماده‌ی معدنی بین لایه‌ای با ضخامت حدود ۴ سانتی متر در بخش خاوری معدن با موقعیت ۳۵۸۳۲۱۹-۷۴۳۹۲۵ در ارتفاع ۱۹۶۷ متری و موقعیت هندسی 125/15 از هر دو روش زاویه سنجی و منطق فازی پیجویی شده است که نشان دهنده‌ی اعتبار دو روش هستند. بنابراین، با مشخص شدن ارزش ساختاری سلول‌های دارای کمبود اطلاعات ساختاری از طریق تلفیق تحلیل زاویه سنجی و فازی سازی سلول‌ها، می توان موقعیت تحمینی هندسی رگه‌های معدنی را بازسازی نمود. به این ترتیب، با اعمال نتایج فازی (شکل ۱۰) بر مدل حاصل از زاویه سنجی (شکل ۸) و تکمیل خلاء ساختاری در شبکه، به مدل جدید و اصلاح شده‌ی زاویه سنجی- فازی می‌رسیم. پس از تشکیل طرح ساختاری، زوایای تمام اجزا ساختاری نسبت به یکدیگر و سطح توپوگرافی اندازه گیری شده‌اند تا مدل حجمی و توزیع کانسارزایی در الگوی سه بعدی ایجاد شود (شکل ۱۱).

تحلیل فضاهای ایجاد شده در اثر حرکت بلوک‌ها با توجه به سازوکار گسل‌ها امکان پیگیری و نزدیک شدن به محل ماده معدنی پنهان را می‌دهد. برای مثال، در جنوب خاوری معدن، از اندرکنش گسل شمال باختری- جنوب خاوری نرمال با مولفه امتدادلغز راستبر با گسل ~ باختری- خاوری نرمال با مولفه امتدادلغز چپبر، جابجایی بلوک‌ها به صورت تواما چرخش و جابجایی مطابق شکل ۱۲ صورت می‌پذیرد که موقعیت این پدیده در نقشه‌ی شکل ۱۳ نشان داده شده است. شواهد روی زمین صرفا آثاری از ماده معدنی را به صورت رگه‌های سیلیسی کربناتی نشان می‌دهند. اما با صفحات جدید ایجاد شده ناشی از

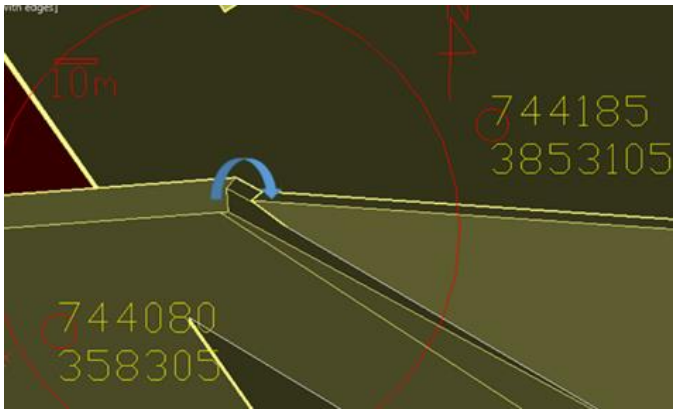
شکستگی بلوک‌ها، می‌توان انتظار شکل‌گیری رگه‌های جدید را در فضاهای باز شده جدید داشت.

نتیجه‌گیری

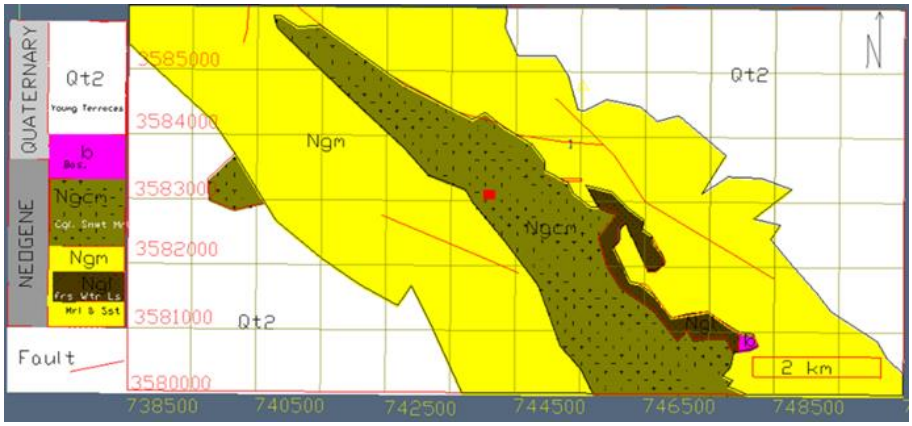
با توجه به هندسه‌ی رگه‌ها و تعیین گسل‌های کنترل کننده‌ی آنها در بخش های مختلف معدن کوه سفید از طریق پیمایش در جهت های مختلف پیرامون رگه های موجود، در صورت وجود شواهدی از رگه هایی با هندسه‌ی متفاوت می‌توان به عضویت‌های مختلف رگه‌ها در منطق فازی پی برد. در محدوده‌ی مورد مطالعه، این رگه‌ها علیرغم شیب کم، در سازوکارهای غالبا نرمال شکل گرفته‌اند و از سویی کنترل کننده‌ی شکستگی‌های منشعب نیز هستند که در تشکیل الگوی رگچه‌ای در محدوده نقش مهمی دارند. گسل‌های با موقعیت هندسی 173/30 از مهمترین ساختارهای کنترل کننده‌ی ماده‌ی معدنی در بخش شمالی معدن درنظر گرفته شده‌اند که میزبان رگه‌های معدنی با ضخامت حدود ۴ متر در فضای ایجاد شده توسط عملکرد گسل نرمال با مولفه‌ی راستالغز راست‌بر هستند. کنترل ساختاری ماده معدنی در شمال خاوری متفاوت از شمال باختری بوده و در ارتباط با رگه‌هایی با موقعیت هندسی 340/55 است. در بخش مرکزی معدن نیز رگه‌های منیزیت واقع در لایه‌های ماسه سنگی توسط گسل‌های معکوس با هند سه 053/38 کنترل می‌شوند. در این پژوهش، استفاده از زاویه سنجی و درجه‌ی عضویت مقادیر و فاصله برای تحلیل فضاهای ایجاد شده در اثر حرکت بلوک‌ها با توجه به سازوکار گسل‌ها و در نتیجه نزدیک شدن به محل ماده معدنی پنهان کمک شایانی برای درک مدل اصلی رگه‌های معدنی است. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که در جنوب خاوری معدن، از اندرکنش گسل شمال باختری- جنوب خاوری نرمال با مولفه امتدادلغز راست‌بر با گسل باختری- خاوری نرمال با مولفه امتدادلغز چپ‌بر، بلوک ها به صورت همزمان چرخش و جابجایی داشته‌اند. بنابراین با تعمیم این رویکرد به سایر مناطق معدنی رگه ای، می‌توان مدل تحلیلی از فضای سه بعدی رگه‌ها بدست آورد.



شکل . ۱۱: مدل نهایی جدید و اصلاح شده‌ی زاویه سنجی-فازی توزیع ماده‌ی معدنی
(سبز: کنترل ساختاری رگه‌های منیزیت، قرمز و نارنجی: به ترتیب شکستگی‌های بدون کانی و کم کانی)



شکل . ۱۲: فضای باز شده توسط اندرکنش دو گسل که منتج به چرخش و جابجایی دو بلوک گسلی و ایجاد صفحه‌ی جدید می‌شود



شکل . ۱۳: موقعیت شکل ۱۲ در نقشه‌ی ساده شده‌ی زمین شناسی (مستطیل قرمز)

تقدیر و تشکر

از همکاری صمیمانه پرسنل محترم شرکت معدنی مواد نسوز بیرجند در تسهیل برداشت‌های میدانی و اسکان صمیمانه قدردانی می شود.

مراجع

خطیب، م م.، زرین کوب، م ح.، ۱۳۹۱. کنترل کننده-های ساختاری در تشکیل رگه‌های معدنی خاور ایران. چهارمین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

زرین کوب، م ح.، امینی، ص.، آفتابی، ع.، کریم پور، م م.، ۱۳۸۴. کانی شناسی، زمین شیمی، موقعیت ساختاری و ارایه مدل ژنتیکی برای لیستونیت‌های خاور ایران. مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، جلد ۱۳، شماره ۲، صفحات ۳۶۳-۳۷۸.

زعیم حسین آبادی، ح.، شاهپسندزاده، م.، هنرمند، م.، شفیعی، شهرام.، ۱۳۹۳. تحلیل ساختاری رگههای منیزیت جهت اکتشاف کانسارهای کرومیت در مجموعه مافیک-اولترامافیک شاداب آبگرم (اسفندقه)، جنوب کرمان. ششمین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

Afzal, P., Ahari, H. D., Omran, N. R., & Aliyari, F. (2013). Delineation of gold mineralized zones using concentration–volume fractal model in Qolqoleh gold deposit, NW Iran. ***Ore Geology Reviews, 55,*** **125-133.**

Azizi, H., Mehrabi, B., & Akbarpour, A. (2009). Genesis of tertiary magnetite–apatite deposits, southeast of Zanjan, Iran. ***Resource Geology, 59*****(4), 330-341.**

Darabi-Golestan, F., & Hezarkhani, A. (2018). R- and Q-mode multivariate analysis to sense spatial mineralization rather than uni-elemental fractal modeling in polymetallic vein deposits. ***Geosystem Engineering, 21*****(4), 226-235.**

Ebadati, N., Foudazi, M., & Behzad, N. (2014). The role of structural and petrological elements in mineralization of hontite and magnesite in Ashin-Naein. ***Advances in Environmental Biology*****, 175-185.**

Ehya, F. (2012). Variation of mineralizing fluids and fractionation of REE during the emplacement of the vein-type fluorite deposit at Bozijan, Markazi Province, Iran. ***Journal of Geochemical Exploration, 112*****, 93-106.**

Ferraro, J. M. (2013). Relationships between deformation and mesothermal veins in the Sunshine Mine Area, Coeur d'Alene district, Idaho.

Jamali, H., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpur, A., & Mehrabi, B. (2010). Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar–Arasbaran volcanic belt,northern Iran. ***International Geology Review, 52*****(4-6), 608-630.**

Kahya, A., & Kuşcu, M. (2014). Source of the mineralizing fluids in ultramafic related magnesite in the Eskişehir area, northwest Turkey, along the İzmir–Ankara Suture: a stable isotope study. ***Turkish Journal of Earth Sciences, 23*****(1), 1-15.**

Kondela, J., Jacko, S., & Vizi, L. (2017). Spatial variability change of MgO content in Jelsava magnesite deposit (Slovakia). ***Metalurgija, 56*****(1-2), 237-240.**

Mahmoodi, M. Y., Bahroudi, A., Ghorbani, M., & Arian, M. (2013). Preliminary exploration of copper minerals in jebal Barez mountains, Iran.

Riedel, W. (1929). Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen ein Beitrag zum Problem der Fiederspatten. ***Zentbl. Miner. Geol. Palaont. Abt.*****, 354-368.**

Sylvester, A. G. (1988). Strike-slip faults. ***Geological Society of America Bulletin, 100*****(11), 1666-1703.**

Tibor, S., & Julián, K. (2010). Structural and Tectonic Composition and Origins of the Magnesite Deposit within the Dúbravský Massif near Jelšava, based on studies at the 220 m elev. Level (Western Carpathians).