

ارتباط کانه‌زایی عنصر آهن با ساختارهای خطی پی‌سنگی به کمک مدل‌های فرکتالی چندگانه در منطقه بافق، ایران مرکزی

معصومه نبی‌لو^۱، مه‌ران آ‌رین^۲، پیمان افضل^۳، احمد ادیب^۴ و احمد کاظمی مهرنیا^۵

^۱دانشجوی دکترا، گروه علوم زمین، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۲استاد، گروه علوم زمین، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۳دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

^۴دانشیار، گروه مهندسی نفت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

^۵استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد محلات، استان مرکزی، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۹

چکیده

مدل‌های چند فرکتالی در سال‌های اخیر به عنوان ابزارهایی مؤثر برای تفکیک واحدهای زمین‌شناسی و نواحی کانه‌زایی از زمینه استفاده شده‌اند. در این مطالعه، مدل فرکتالی عیار-فاصله از ساختارهای گسلی اصلی (C-DMF) ارایه و توزیع معادن آهن شناخته شده در منطقه بافق برای یافتن سیمای کانه‌زایی آهن با توجه به فاصله از گسل‌های پی‌سنگی، گسل‌های سطحی و درزه‌های اصلی بر پایه اطلاعات دورسنجی، ژئوفیزیک هواپردی و پیمایش‌های صحرایی رده‌بندی شده است. رده‌بندی کانه‌زایی آهن بر پایه مدل C-DMF در دو برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ بهاباد و اسفوردی نشان می‌دهد که کانه‌زایی اصلی آهن ارتباط قوی با فاصله از گسل‌های پی‌سنگی و اصلی دارد. بر این اساس فاصله کانه‌زایی آهن در حد آستانه عیاری میان ۵۵٪ تا ۶۰٪ در این منطقه کمتر از یک کیلومتر نسبت به گسل‌های پی‌سنگی است. در حالی که چنین فاصله‌ای برای درزه‌های اصلی در همین حد آستانه عیاری در حد فاصل میان ۱۷۷۸ تا ۲۳۴۴ متر و برای گسل‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ برکه‌های بهاباد و اسفوردی، در دو حد آستانه عیاری میان ۴۳٪ تا ۶۰٪ در حد فاصل میان ۳۱۶۲ تا ۴۳۶۵ متر است. این موضوع، نشان‌دهنده ارتباط مثبت میان کانه‌زایی آهن و گسل‌های پی‌سنگی است. به بیان دیگر شواهد همجواری کانه‌زایی بر عیار آهن پرکامبرین با گسل‌های پی‌سنگی، نشان از رویدادهای زمین‌ساختی همزمان با کافت دارد. مدل فرکتالی C-DMF ارائه شده در این پژوهش، می‌تواند کلیدی برای اکتشاف ذخایر معدنی ماگمایی و گرمایی باشد.

کلیدواژه‌ها: مدل چند فرکتالی، عیار-فاصله از گسل اصلی، کانه‌زایی آهن، اسفوردی، بافق.

***نویسنده مسئول:** مه‌ران آ‌رین

E-mail: mehranarian@yahoo.com

۱- پیش‌نوشتار

ایده‌های مربوط به ارتباط میان کانه‌زایی و ساختارهای زمین‌شناسی به پیش از ۱۹۵۲ باز می‌گردد. البته، در طول ۲۰ سال گذشته پژوهش‌های صورت گرفته در مورد تحلیل‌های ساختاری نشان از اهمیت و نقش مهم ساختارها در تشکیل مواد معدنی دارد (Crow and Campbell, 2004; Drew, 2006; Wang et al., 2012). شناخت وضعیت ساختاری می‌تواند کلید اکتشافی در پی‌جویی‌های مواد معدنی باشد. داده‌های ماهواره‌ای و ژئوفیزیک هوایی ابزارهای مفیدی در زمینه تعیین مناطق دگرسانی در کانسارهای معدنی، بررسی وضعیت زمین‌ساختی و مطالعه ارتباط آن با کانه‌زایی هستند که در کنار آن می‌توان از بررسی‌های ژئوشیمیایی با کمک روش‌های نوین مانند روش‌های مبتنی بر هندسه فرکتال به منظور شناسایی بهتر این رابطه استفاده کرد. توزیع و پراکندگی ژئوشیمیایی عناصر تابع فرایندهای زمین‌شناسی همچون فعالیت‌های آتشفشانی یا توده‌های نفوذی، فرایندهای رسوبی، زمین‌ساخت، فرایندهای دگرگونی و کانی‌سازی است. این فرایندها ویژگی‌های خود تشابهی دارند و از این رو می‌توانند خواص فرکتال و مولتی فرکتال برای آنها قائل شد (افضل، ۱۳۸۹؛ یوسفی فر، ۱۳۹۰؛ Mandelbrot, 1983; Ghavami-Rajabi, 2007; Khalajmasoumi et al., 2016; Afzal et al., 2017). نخستین بار (Turcotte (1986) و Meng and Zhao (1991) نشان دادند که همبستگی و رابطه فرکتال میان متغیرهای زمین‌شناسی و عناصر گوناگون وجود دارد. مطالعات انجام شده (Bolvik et al., 1992; Cheng et al., 1994; Agterberg et al., 1996) همبستگی فرکتال میان عیار و تمرکز عناصر و ویژگی‌های هندسی پراکندگی ژئوشیمیایی آنها را نشان می‌دهند. روش‌های فرکتال بسیاری برای اکتشاف ژئوشیمیایی و تشخیص بی‌هنجاری‌ها به کار گرفته می‌شود که شامل روش‌های عیار-مساحت (Cheng et al., 1994)، روش طیف توان-مساحت

(Cheng et al., 1994)، روش عیار-فاصله (Li et al., 2003) و روش عیار-تعداد (Hassanpour and Afzal, 2013) است. (Nouri et al., 2013) با استفاده از مدل‌های فرکتالی تمرکز عیار-فاصله نسبت به گسل‌های اصلی (C-DMF) در منطقه طارم زنجان، متوجه ارتباط مثبت میان کانه‌زایی و ساختارها شدند. در پرکامبرین پایانی-کامبرین آغازین ایران، کانسارهای پرشماری از اکسید آهن آپاتیت‌دار نوع کاپرونا کشف و شناسایی شده است. منطقه بافق به دلیل وضعیت خاص زمین‌شناسی ساختمانی و سنگ‌شناسی، دربرگیرنده نشانه‌ها و کانسارهای فلزی و چندفلزی، به‌ویژه آهن، سرب و روی بوده است که بیشتر آنها از نوع گرمایی شناخته شده‌اند (Jami et al., 2007; Daliran, 2002; Samani, 1988؛ افضلی و همکاران، ۱۳۹۰). این کانسارها در پهنه فلززایی ایران مرکزی با سنگ میزبان آتشفشانی-رسوبی کامبرین زیرین قرار دارند. از این کانسارها می‌توان میشدوان (Daliran, 2002)، اسفوردی (Jami et al., 2007; Jami, 2006)، بی‌هنجاری شمالی (سپهری‌راد، ۱۳۷۹؛ بهزادی، ۱۳۸۵)، چغارت (کارگران بافقی، ۱۳۸۰؛ Daliran et al., 2007 and 2010) را نام برد. (Forster and Jafarzadeh (1994) کانسارهای آهن-آپاتیت منطقه بافق را از نوع ماگمایی کاپرونا و آنها را در ارتباط با سنگ‌های اسیدی دانسته‌اند. به‌طور (Daliran et al., 2007) در منطقه معدنی بافق، کانی‌سازی آهن، آپاتیت و عناصر خاکی کمیاب، مشابه دیگر کانسارهای Fe-P-REE-Th-U دنیا منشأ گرمایی دارد. دگرسانی متاسوماتیک و کانی‌سازی انجام شده در امتداد پهنه‌های ساختاری، نشان‌دهنده کنترل زمین‌ساختی-ماگمایی در زمان کوتاه کانی‌سازی در منطقه است (Samani, 1988). در این پژوهش پس از استخراج گسل‌ها از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰، دورسنجی و ژئوفیزیک با استفاده از مدل‌سازی فرکتالی ارتباط میان میزان

ساخند و کاشمر- کرمان و همچنین گرانت‌های پی‌سنگ ایران مرکزی، نشان‌دهنده نبود رخداد کافت درون‌قاره‌ای در این منطقه بوده و معرف موقعیت فعالیت ماگمایی کمانی از نوع آنداست (Ramezani and Tucker, 2003 و Hasanzadeh et al., 2008). رخداد این فعالیت ماگمایی در پهنه پشت‌بادام و طی نئوپروتروزویک پسین تا کامبرین پیشین، با کشش پشت کمانی یعنی کافت پشت کمانی در اثر فرورانش پوسته اقیانوسی پروتوتتیس به زیر ایران مرکزی در حاشیه شمالی گندوانا همراه بوده است (Ramezani and Tucker, 2003). این زمین‌ساخت کششی با فعالیت آتشفشانی نوع قلیایی و نفوذ گرانت‌ها شروع شده است. نفوذ گرانت‌ها، پیدایش آلکالی ریولیت و توف اسیدی و تشکیل سازند تاشک و سری‌های ریزو و دزو (سازند اسفوردی) همزمان با این فعالیت کششی بوده است (Nadimi, 2006؛ آذرایین و آفتابی، ۱۳۸۳). کانه‌زایی‌های مختلف به‌ویژه آهن، روی و سرب را در حوضه بافق در ارتباط با فعالیت آتشفشانی قلیایی و زمین‌ساخت کششی رخ داده در آن محیط می‌دانند. ناحیه بافق، طی دوره‌ای از فعالیت‌های زمین‌ساختی همراه با فعالیت دوباره گسل‌های همزمان با رسوب‌گذاری، رسوبات آواری ناشی از فعالیت گسل‌ها، جایگزینی سنگ‌های آتشفشانی ریولیتی، فرونشست رسوبات کافتی و ته‌نشست سازند اسفوردی تشکیل شده است (رجبی، ۱۳۸۷). در این ناحیه از ایران مرکزی، مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی آواری و کربنات (به‌ویژه دولومیت)، با یک مرز ناپیوسته روی سازند تاشک (ماسه‌سنگ و گنگلومرا به همراه مقادیری توف) با سن پراکامبرین بالایی گزارش شده است (شکل ۱). Ramezani and Tucker (2003) سرشت سنگ‌های آذرین ناحیه را قلیایی می‌دانند. ترکیب سنگ‌های آتشفشانی از بازالت تا ریولیت تغییر می‌کند و نیز این توالی (سری ریزو و یا سازند اسفوردی)، با اینفراکامبرین و کامبرین زیرین (Huckride et al., 1962) و یا کامبرین (Ramezani and Tucker, 2003) زیرین نشان داده می‌شود. این توالی توسط سازند داهو متشکل از سنگ‌های تخریبی به ویژه ماسه‌سنگ سرخ و کمی کنگلومرا پوشیده می‌شود.

عیار معادن سنگ آهن و ساختارهای منطقه، مورد بررسی و بحث قرار گرفته است.

۲- روش پژوهش

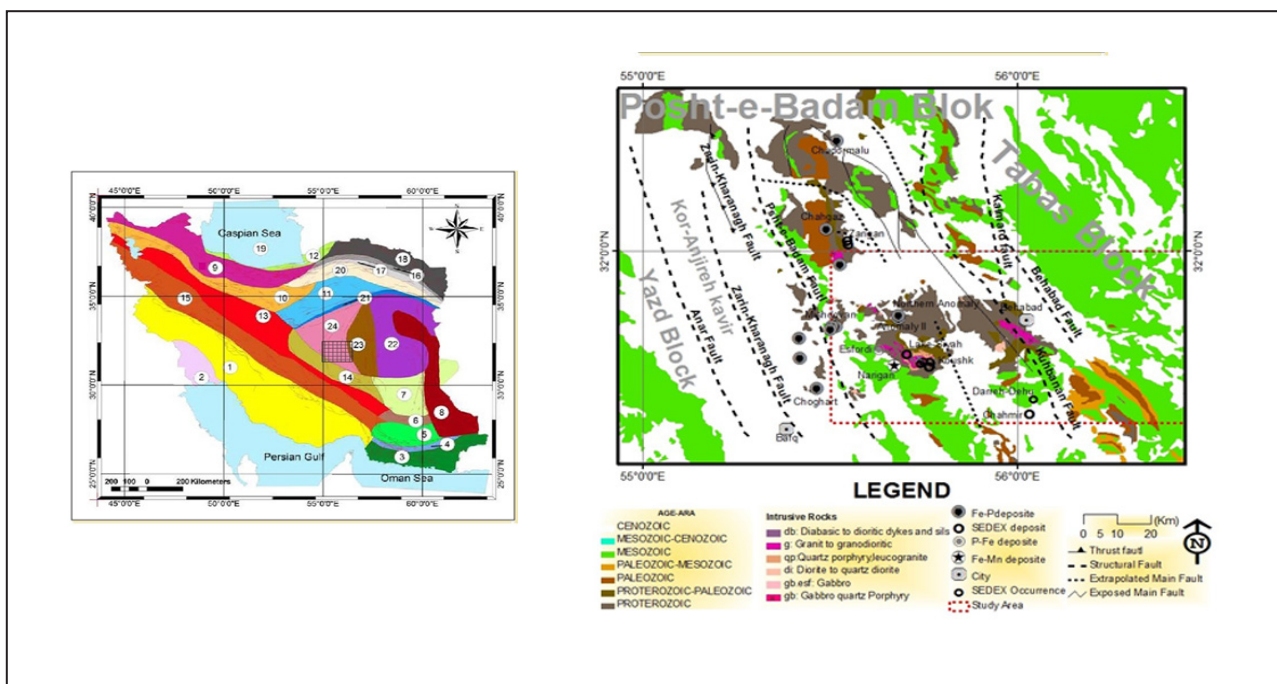
در این پژوهش با استفاده از مدل فرکتالی عیار (معادن شناخته شده)- فاصله از ساختارهای گسلی سطحی مانند درزه‌های اصلی، گسل‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ برکه‌های بهاباد و اسفوردی و گسل‌های پی‌سنگی ژئوفیزیکی، با در نظر گرفتن میزان توزیع عنصر آهن در معادن منطقه بافق به شناخت ساختارهای مؤثر در بالاترین میزان کانه‌زایی و ایجاد معادن، نشانه‌های معدنی و کانسارها پرداخته می‌شود. برای یافتن اطلاعات ساختارها از نقشه‌های زمین‌شناسی، داده‌های دورسنجی و مغناطیس‌سنجی هواپردی برداشت شده با یک شبکه ۵۰۰ متر استفاده شده است. (Nouri et al. 2013). با استفاده از مدل‌های فرکتالی تمرکز عیار- فاصله نسبت به گسل‌های اصلی و فرعی (C-DMF) و درزه‌های اصلی، که خود بر پایه مدل عیار- تعداد، گسترش یافته است؛ متوجه ارتباط مثبت میان کانه‌زایی و رویدادهای زمین‌ساخت در منطقه تارم شدیم که مدل C-DMF بر پایه رابطه زیر نشان داده شده است:

$$DMF (\geq p) \propto Fp^{-D}$$

در این رابطه p عیار عنصر (در این پژوهش آهن) و $DMF (\geq p)$ فاصله تجمعی از درزه‌های اصلی، گسل‌های پی‌سنگی و گسل‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ دو برکه بهاباد و اسفوردی است که بزرگ‌تر از یا مساوی با نقاط معادن و کانسارهاست. F نسبتی ثابت و D بعد فرکتالی فراوانی عیار معادن است.

۳- زمین‌شناسی و جایگاه زمین‌ساختی

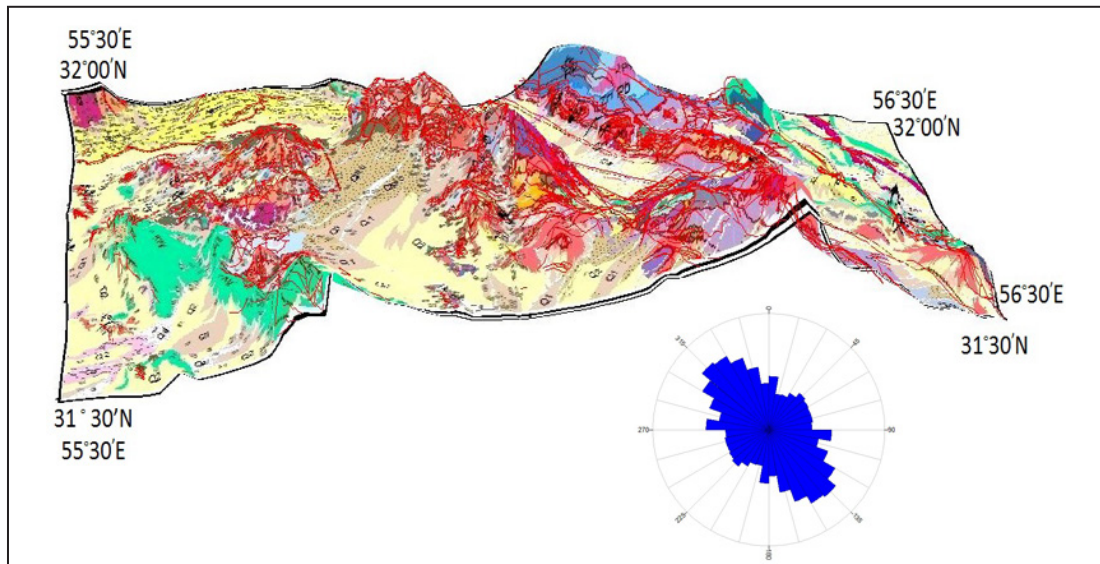
به باور Talbot and Alavi (1996) پوسته قاره‌ای ایران مرکزی طی کامبرین زیرین و تحت تأثیر فرایندهای زمین‌ساخت کششی دپار کافت ناقص در طول حاشیه عربی گندوانا شده است که رخداد فعالیت ماگمایی کامبرین زیرین و بالازدگی سست‌کره را دلیل این کافت‌زایی می‌دانند. اما بررسی سنگ‌های آذرین و دگرگونی ناحیه‌ای



شکل ۱- الف) تقسیم‌بندی فیزیوگرافیک- زمین‌ساختی حوضه‌های رسوبی ایران. بخشی از محدوده بافق با کادر مشبک مشخص شده است (آرین، ۱۳۹۰؛ ب) نقشه زمین‌شناسی بلوک پشت‌بادام، بخشی از بلوک‌های یزد و طبس همراه با گسل‌های اصلی معرفی شده در مقاله Rajabi et al. (2012)، شامل بهاباد، کوه‌بان، کلمرد، پشت‌بادام و برخی معادن شناخته شده که در نقشه نام‌گذاری شده‌اند. کادر با خط منقطع سرخ رنگ، محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

(شکل ۱- الف؛ آراین، ۱۳۹۰). کانسارها و معادن مختلف سرب و روی، سنگ آهن، آپاتیت - منگنیت و منگنز (شکل های ۱- ب و ۲) در ناحیه وجود دارد (Rahimi et al., 2016; Heidarian et al., 2017) که در این مطالعه تنها به معادن آهن یا مرتبط با آهن پرداخته می شود (شکل های ۲، ۴- الف و ب و ۶).

ناحیه مورد مطالعه در دو برکه ۱:۱۰۰,۰۰۰ اسفوردی (سهیلی و مهدوی، ۱۳۷۰) و بهاباد (مهدوی، ۱۳۷۵) در استان یزد گسترش ۶۲۶۲ کیلومتر مربع را شامل می شود (شکل ۲) که از دید ساختاری، جزو پهنه ایران مرکزی، زیرپهنه بافتی- پشت بادام (شکل ۱- ب؛ Rajabi et al., 2012a) و حوضه سوار بر پشت یزد- خور است



Efordi & Behabad 1:100,000 Geology map Legend

<p>CENOZOIC</p> <ul style="list-style-type: none"> Q1: Sand dunes Q2: Fine silty mud flats, locally silty Q3: Recent alluvium in stream channel Q4: Low level piedmont fan (usually gravel, often sandy) in Behabad map Q5: High level piedmont fan (gravel fans in Behabad map) Q6: Only consolidated conglomerate and sand Q7: Conglomerate, sandstone, minor gypsiferous marl Q8: Pale grey-green shale, fine grained sandstone & marl Q9: Pale grey-green shale, fine grained sandstone & marl (BAGHAMSHAH F.) Q10: Dark grey flaggy peccant limestone Q11: Gypsum horizons, gypsiferous marl and minor peccant limestone Q12: Peccant bearing limestone, evaporite & minor volcanic rocks Q13: Well bedded, light grey peccant limestone and gypsiferous marl Q14: White quartzite sandstone and hematized calcareous shale with coal lenses (HOLEK F.) Q15: Yellowish brown with minor sandstone Q16: Micaceous sandstone, shale with coal lenses, minor thin bedded limestone, partly marl (km) Q17: Thin bedded limestone, partly marl Q18: Thin bedded limestone, partly marl Q19: Thin bedded limestone, partly marl Q20: Thin bedded limestone, partly marl Q21: Thin bedded limestone, partly marl Q22: Thin bedded limestone, partly marl Q23: Thin bedded limestone, partly marl Q24: Thin bedded limestone, partly marl Q25: Thin bedded limestone, partly marl Q26: Thin bedded limestone, partly marl Q27: Thin bedded limestone, partly marl Q28: Thin bedded limestone, partly marl Q29: Thin bedded limestone, partly marl Q30: Thin bedded limestone, partly marl 	<p>PALEOZOIC, PALEOZOIC-PROTEROZOIC & PROTEROZOIC</p> <ul style="list-style-type: none"> P1: Reddish brown calcareous sandstone, siltstone, fossiliferous limestone, light grey to green P2: Dark grey chert banded, stromatolite bearing dolomite, calcareous shale, dolomite, siltstone, sandstone, chert bands P3: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P4: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P5: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P6: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P7: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P8: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P9: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P10: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P11: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P12: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P13: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P14: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P15: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P16: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P17: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P18: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P19: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P20: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P21: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P22: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P23: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P24: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P25: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P26: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P27: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P28: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P29: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands P30: Dolomite, sandy dolomite, massive to bedded grey to light brown, chert bands 	<p>Intrusive Rocks</p> <ul style="list-style-type: none"> gb: Gabbro, quartz porphyry gd: Diorite to quartz diorite gs: Granite to granodiorite gt: Quartz porphyry, leucogranite gv: Granite to quartz diorite gw: Granite to quartz diorite gx: Granite to quartz diorite gy: Granite to quartz diorite gz: Granite to quartz diorite ha: Diorite to quartz diorite hb: Diorite to quartz diorite hc: Diorite to quartz diorite hd: Diorite to quartz diorite he: Diorite to quartz diorite hf: Diorite to quartz diorite hg: Diorite to quartz diorite hh: Diorite to quartz diorite hi: Diorite to quartz diorite hj: Diorite to quartz diorite hk: Diorite to quartz diorite hl: Diorite to quartz diorite hm: Diorite to quartz diorite hn: Diorite to quartz diorite ho: Diorite to quartz diorite hp: Diorite to quartz diorite hq: Diorite to quartz diorite hr: Diorite to quartz diorite hs: Diorite to quartz diorite ht: Diorite to quartz diorite hu: Diorite to quartz diorite hv: Diorite to quartz diorite hw: Diorite to quartz diorite hx: Diorite to quartz diorite hy: Diorite to quartz diorite hz: Diorite to quartz diorite
---	---	---

شکل ۲- نقشه سه بعدی، به صورت تلفیقی از لایه های اطلاعاتی Dem Aster زمین شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ دو برکه اسفوردی و بهاباد به همراه نمودارهای گل سرخی مربوط به راستای گسل ها.

رسوبات ترشیری و کواترنری بیشتر شامل مجموعه‌هایی از کنگلومرا، ماسه‌سنگ و آبرفت‌های جوان هستند. توده‌های نفوذی موجود در منطقه شامل گرانیت‌های زیریگان، ناریگان، بهاباد و سینیت اسفوردی و مجموعه‌ای از دایک‌های دیوریتی و گابرویی هستند. واحدهای سنگی سازنده رشته‌کوه‌های خاور و باختر بهاباد تاریخ فرگشت چینه‌زمین ساختی متفاوتی دارند و به دلیل مطالعه کانسارهای آهن که اختصاص به برگه اسفوردی دارد؛ از توضیح جزئیات زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ برگه بهاباد خودداری شد.

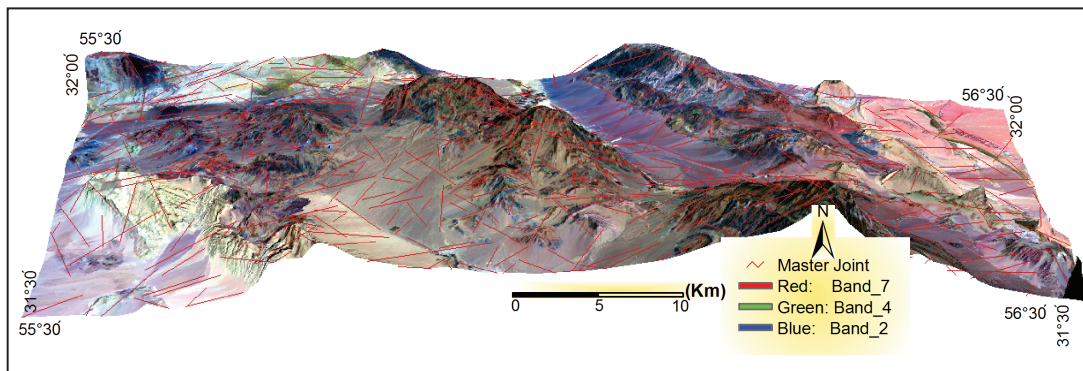
۴- ساختارهای گسلی

ساختارهای گسلی ژرف و سطحی منطقه با توجه به زمان تشکیل برای مطالعه در این پژوهش به سه دسته تقسیم شده است.

۴-۱. درزه‌های اصلی

عوارض شکستگی موازی سطحی در نقشه ماهواره‌ای Landsat 8 با رعایت باندهای ۷ (سرخ)-۴ (سبز)-۲ (آبی) رسم شد (شکل ۳). درزه‌ها با ابعاد ده‌ها تا هزاران متر که در فواصل مکرر از چندین سانتی‌متر تا ده‌ها متر هستند را می‌توان به عنوان درزه‌های اصلی در نظر گرفت. این شکستگی‌ها ساختارهایی هستند که می‌توانند همانند گسل‌ها، همزمان و یا پس از زمین‌ساخت تشکیل و یا گسترش یافته باشند.

کهن‌ترین سنگ‌های این ناحیه مربوط به پرکامبرین است که مجموعه‌هایی از سنگ‌های دگرگونی شیت، گنایس، مرمر و آمفیبولیت را شامل می‌شود. کهن‌ترین واحدهای رسوبی موجود در منطقه، ترادفی از شیل و ماسه‌سنگ اسلیتی و فیلیتی (سازند تاشک) است که به‌طور ناهمساز، توسط نهشته‌های کربناته-آواری-آتشفشانی مربوط به پرکامبرین-کامبرین زیرین (سری ریزو) پوشیده شده است. سازندهای باروت، زاگون، لالون و میلا در بخش‌های خاوری این برگه گسترش یافته‌اند. رخساره آنها شامل دولومیت، ماسه‌سنگ، شیل، سنگ‌آهک تریلوبیت‌دار و دولومیت است. نهشته‌های اردووسین با رخساره آهکی گسترش محدود دارد که روی آن، گدازه‌های آندزیتی، توف آندزیتی، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک‌های به سن سیلورین جای می‌گیرد. رسوبات دونین در شمال خاوری برگه یاد شده گسترش دارد و سنگ‌شناسی آن شامل سنگ‌آهک‌های براکیوپود-گاستروپوددار، ماسه‌سنگ و دولومیت است. رسوبات پرمین با رخساره آهکی رخنمون دارند. واحدهای تریاس به شکل دگرشیب روی رسوبات پرمین جای گرفته‌اند و شامل شیل، سنگ‌آهک‌های نازک‌لایه، دولومیت، ماسه‌سنگ و گچ هستند. واحدهای ژوراسیک بیشتر شامل شیل‌های میکادار، ماسه‌سنگ‌های کوارتزی و شیل‌های زغال‌دار به همراه آثار گیاهی است. سنگ‌های کرتاسه به‌طور دگرشیب روی واحدهای کهن جای می‌گیرند و شامل کنگلومرا، مارن، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک نازک تا ستبرلایه هستند.



شکل ۳- نقشه سه بعدی مربوط به تلفیق لایه اطلاعاتی DEM Aster و ماهواره‌ای دورسنجی Landsat 8 (آگوست ۲۰۱۵) به همراه درزه‌های اصلی استخراج شده از آن.

۵- اجرای روش فرکتالی عیار-فاصله از ساختارهای گسلی

روش‌های مبتنی بر هندسه فرکتال در علوم زمین به‌صورت تحلیل شکل‌های پیچیده ساختارهای زمین‌شناسی، به‌ویژه در شاخه‌های زمین‌شناسی ساختمانی و مهندسی و برای جدایش جوامع ژئوشیمیایی و کانی‌زایی، به‌ویژه در زمین‌شناسی اقتصادی، اکتشاف معدن و ژئوفیزیک کاربرد دارند. در این میان روش‌های عیار-مساحت، عیار-محیط، عیار-تعداد و طی فتوان-مساحت در علوم زمین بسیار کاربرد دارند. اساس این روش‌ها ارتباط و ارون میان متغیر ناحیه‌ای و مکان هندسی تجمعی آنهاست. مکان هندسی می‌تواند شامل محیط، مساحت، حجم یا فاصله از یک عارضه باشد (Afzal et al., 2017; Khalajmasoumi et al., 2016). در این مطالعه به‌صورت نوین از روش فرکتالی عیار-فاصله از ساختارهای گسلی استفاده خواهد شد.

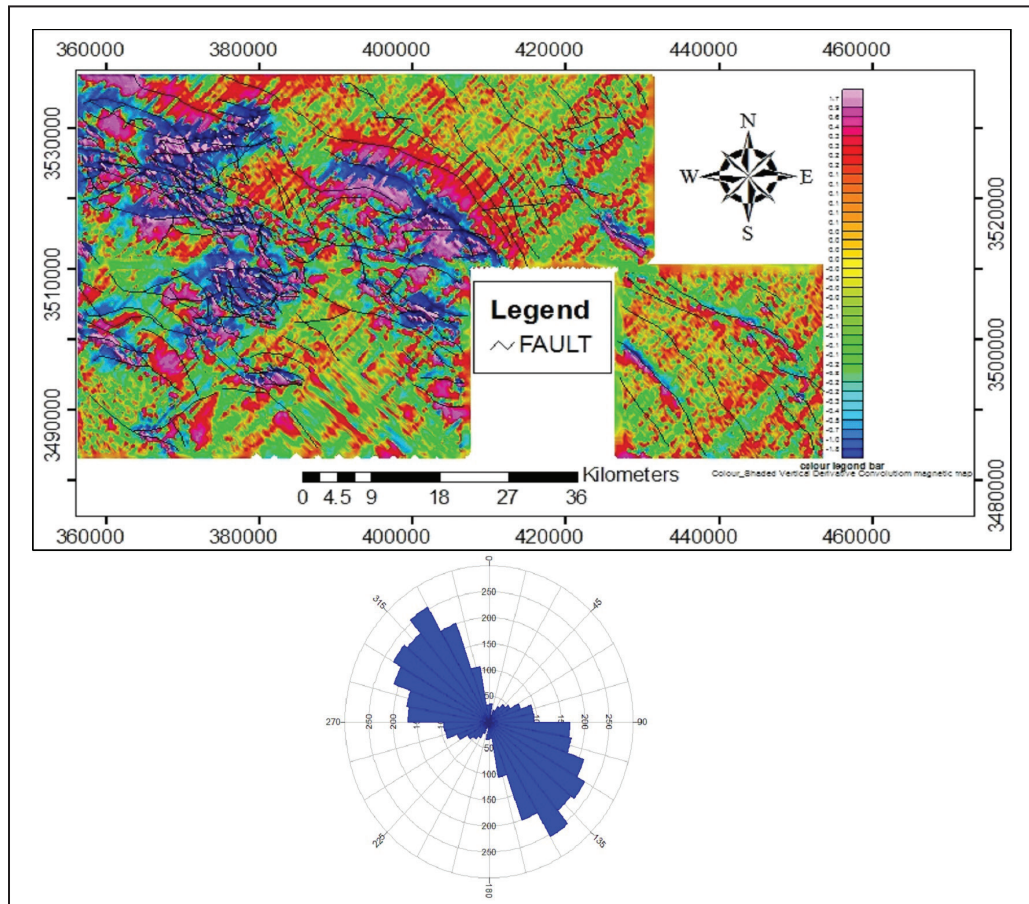
به لحاظ ساختاری، محدوده مورد مطالعه در یک ناحیه خرد شده جای دارد (شکل‌های ۱-ب، ۳ و ۴). در این پژوهش برای دانستن میان کانه‌زایی و ساختارهای گسلی، از مدل فرکتال عیار-فاصله از گسل برای شناسایی ساختارهای کنترل‌کننده کانه‌زایی استفاده می‌شود. بنابراین باید به فاصله عیار عناصر نسبت به درزه‌های اصلی استخراج شده از نقشه ماهواره‌ای دورسنجی، گسل‌های سطحی استخراج شده از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ و گسل‌های ژرف پی‌سنجی استخراج شده از نقشه‌های مغناطیسی هواپردی با وضوح ۵۰۰ متر هر کدام به‌صورت معجزا به کمک این مدل ریاضی توجه شود.

۴-۲. گسل‌های زمین‌شناسی برگه‌های ۱:۱۰۰,۰۰۰ بهاباد و اسفوردی

این گسل‌ها از روی نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ اسفوردی و بهاباد (شکل ۲) استخراج شده‌اند. بنابراین بنابراین با توجه به نمودارهای گل‌سرخ (شکل ۲)، روند چیره ساختارهای گسلی شمال خاوری-جنوب باختری است.

۴-۳. گسل‌های ژرف پی‌سنجی

این گسل‌ها به‌صورت خطواره مغناطیسی از نقشه‌های مغناطیسی هواپردی با وضوح ۵۰۰ متر، برداشت شده توسط سازمان انرژی اتمی ایران، استخراج شده‌اند. در نقشه‌های مغناطیسی، اثرات خط پرواز در تشکیل خطواره‌های مغناطیسی روی نقشه اختلال ایجاد می‌کنند و می‌توان تنها، خطواره‌هایی را به تصویر کشید که در راستای روند اصلی ساختارها قرار دارند. زیرا برداشت‌های هوایی معمولاً در راستای روند اصلی ساختارهای منطقه هستند و در سوی مخالف به‌ویژه در نقشه‌های مغناطیسی محدوده بافق اثرات خطی پرواز دیده می‌شود و به دلیل اختلالات ایجاد شده در نقشه به واسطه این اثرات، نمی‌توان خطواره‌ای در راستای آنها رسم و به آنها استناد کرد. با استفاده از نرم‌افزار Oasis Montaj، داده‌های مغناطیسی منطقه پردازش و در پایان پس از انجام روش‌های نرم‌افزاری، با مشتق‌گیری عمودی، شکل ۴ ایجاد و پس از آن گسل‌های مغناطیسی به‌صورت جداگانه رسم شد (شکل ۴). در نقشه‌های شکل‌های ۳ و ۴، راستای ساختارهای گسلی همانند نقشه‌های زمین‌شناسی به‌صورت شمال باختری-جنوب خاوری است (شکل ۴).

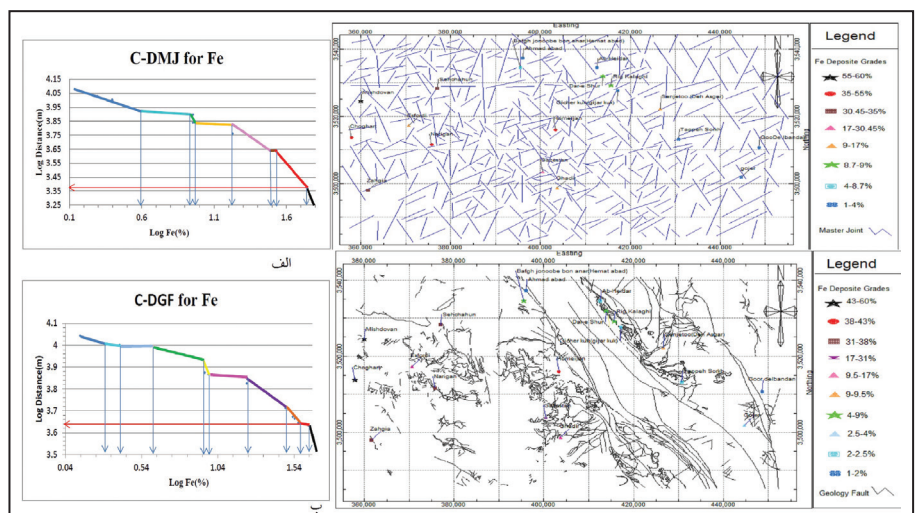


شکل ۴- نقشه مشتق عمودی مغناطیسی هواپردی با وضوح ۵۰۰ متر به همراه گسل‌های پی‌سنگی و نمودار گل‌سرخ‌ی مربوط به راستای گسل‌های پی‌سنگی.

فرکتالی با جوامع عیاری معادن به رنگ‌های مشخص ایجاد شد که جوامع با تغییر شیب میان نقاط دو پله (میان دو جامعه عیاری) غیر همشیب مجاور، تغییر می‌یابد (شکل‌های ۵-الف و ب و ۶ و جدول ۱). جدول ۲ به معرفی معادن، کمترین میزان فاصله معدن نسبت به ساختارهای گسلی مجاور آن (به غیر از درزه‌های اصلی) و سازوکار چیره گسل مجاور و جدول ۱ به معرفی اجزای نمودار C-DMF شامل معرفی هر جامعه، معادن مرتبط، شیب خطی، بازه عیاری و بازه فاصله از ساختارهای گسلی هر جامعه اشاره دارند. در شکل‌های ۵-الف و ب و ۶ با بالا رفتن میزان عیار ماده معدنی آهن، پله‌های فرکتال به سوی پایین تغییر شیب حاصل می‌کنند. این بدین معناست که با کاهش فاصله از گسل، میزان عیار کانسار، معدن یا نشانه معدنی، بالا می‌رود.

با در نظر گرفتن این رابطه و نام‌گذاری ترجیحی با توجه به وجود ۳ نوع ساختار گسل، متشکل از درزه‌های اصلی، گسل‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ دو برکه بهاباد و اسفوردی و گسل‌های پی‌سنگی برای آسانی نام‌گذاری در نمودار و شناسایی، به ترتیب DGF (Distance Geology Fault)، DMJ (Distance Master Joint) و DMBF (Distance Magnetic Basement Fault) نام‌گذاری شدند. در منطقه بافق برداشت‌های لیتوژئوشیمیایی یکپارچه انجام نشده و این برداشت‌ها محدود به برداشت‌های لیتوژئوشیمیایی محلی، از معادن می‌شود. بنابراین در این پژوهش از میزان عیار میانگین معادن بررسی شده توسط دیگران، برای مطالعه و ایجاد نقشه‌های عیار-فاصله استفاده شد (جدول ۲). با استفاده از نرم‌افزار Rock works و Excel، ۳ نقشه نشانه‌های معدنی ناحیه بر پایه مدل‌سازی فرکتالی، به همراه نمودار لگاریتمی

شکل ۵- نقشه نشانه‌های معدنی با رنگ‌بندی بر پایه نمودار لگاریتمی فرکتالی عیار-فاصله معادن، نشانه معدنی و کانسار آهن نسبت به: الف) درزه‌های اصلی استخراج شده از نقشه‌های دورسنجی Land sat 8 (C-DMJ)؛ ب) گسل‌های زمین‌شناسی استخراج شده از نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰ (C-DGF).

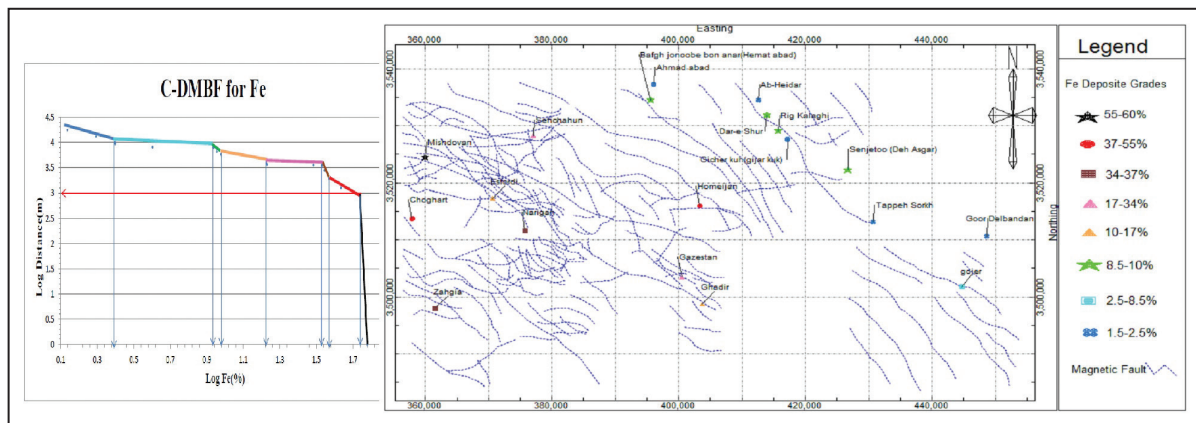


جدول ۱- اجزای نمودارهای C-DMF مربوط به شکل‌های ۵- الف، ۵- ب و ۶.

اجزای نمودار C-DMF												
گسل‌های نی سسکی (C-DMBF)				گسل‌های زمین شناسی (C-DGF)				گسل‌های بزرگ دورسنجی (C-DM)				
شیب جامه فرکتال (درجه)	فاصله تجمعی معدن از گسل‌های بی‌سنکی (متر)	عبارت Fe (%)	مکان موجود در جامه فرکتالی	شیب جامه فرکتالی (درجه)	فاصله تجمعی معدن از گسل‌های زمین‌شناسی (متر)	عبارت Fe (%)	مکان موجود در جامه فرکتالی	شیب جامه فرکتال (درجه)	فاصله تجمعی معدن از دوزنهای بزرگ دورسنجی (متر)	عبارت Fe (%)	مکان موجود در جامه فرکتالی	
10	12589<DMEF	1.5	گسل‌های بی‌سنکی، آب‌خیز و استخوان‌آباد	۱۲	10222<DGF	1Fe	آبی	۳	8414<DM	1	گورستان‌های قدیم و جدید، گسل‌های بی‌سنکی، گسل‌های زمین‌شناسی، گسل‌های بزرگ دورسنجی، آب‌خیز و استخوان‌آباد	آبی
0	10000<DMEF	2.5	گسل‌های بی‌سنکی	۱۲	9885<DGF	2Fe	آبی روشن	۵	7948<DM	4	باقی‌جانب‌های باغ (مستطیل‌ها)	آبی روشن
35	7079<DMEF	8.5	باقی‌جانب‌های باغ، دره‌سور و رنگ‌کلاهی سنج	۵	9750<DGF	2.5	آبی کهربایی	۵	6918<DM	8.7	دره‌سور و رنگ‌کلاهی سنج	سبز
8	4385<DMEF	10	الغوردی و غدیر	۱۶	8511<DGF	4	سبز	۴	6888<DM	9	سنجور (دانشگاه) غدیر و الغوردی	نازایی
2	4188<DMEF	17	ساجموت و گورستان	۷۰	7144<DGF	9	نازایی	۳۵	4468<DM	17	گورستان	صورتی
65	1995<DMEF	34	زاویه و رنگ‌کلاهی	۴	6918<DGF	9.5	صورتی	۰	4466	30.45	ساجموت و زاویه	قهوه‌ای
23	1000<DMEF	37	چهارت و مسجیان	۳۴	5248<DGF	17	بنفش	۳۵	2344<DM	35	چهارت، رنگ‌کلاهی و مسجیان	قرمز
85	1<DMEF	55	مسجیان	۴۵	4671<DGF	31	قهوه‌ای	۵۵	2344<DM	55	مسجیان	سبزه
					4085<DGF	38	سرخ					
					3162<DGF	43	سبزه					

جدول ۲- معادن آهن و مرتبط با آهن و فواصل این معادن نسبت به نزدیک‌ترین ساختارهای خطی مربوط به شکل‌های ۵-الف، ۵-ب و ۶.

منابع برای میزان چلور معدن	ماده معدنی اصلی	فاصله معادن دارای عنصر آهن نسبت به ساختارهای گسلی (بر حسب متر) و نام گسل										نام معدن/کانسوز / نشانه معدنی		
		نزدیک‌ترین فاصله از درزه‌های بزرگی	نام و سازوکار چهره نزدیک‌ترین گسل زمین‌شناسی به معدن	نزدیک‌ترین فاصله از گسل‌های زمین‌شناسی	نام و سازوکار چهره نزدیک‌ترین گسل بی‌سنگی به معدن	نزدیک‌ترین فاصله از گسل‌های بی‌سنگی	آهن (%)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	D°				
(Molisen and Ahab) (2015)	آهن	1,230	رستانلور راست‌گرد	433	وارون	576	60	48	30	31	12	31	55	میدوان
(Molisen and Ahab) (2015)	آهن	2,357,000	عادی	3,374,600	وارون	827	55	0	45	31	0	30	55	چهارت
(Mokhtari and Ebrahimi) (2015)	آهن	873	رستانلور چپ‌گرد	920	وارون	440	43	30	46	31	45	58	55	محمیان
(Nobahin et al.) (2015)	آهن	640	رستانلور راست‌گرد	115	وارون	648	37	0	44	31	18	41	55	ناریگان
(Sadeghi et al.) (2012)	آهن	228		209	وارون	899	35	31	36	31	25	32	55	زانغا
(Molisen and Ahab) (2015)	آهن	268	عادی	92	رستانلور چپ‌گرد	717	34	0	53	31	0	42	55	سه‌چاهون
(فدایی‌جانی و سپهری‌راد) (۱۳۹۱)	آهن	22	رستانلور راست‌گرد	447	وارون	472	30	45	39	31	0	57	55	گریستان
(Molisen and Ahab) (2015)	آهن	1,383	وارون	1,527	وارون	77	17	0	47	31	0	38	55	استوردهی
پایگاه داده‌های علوم زمین	سرب-روی	861	وارون	433	وارون	281	17	10	37	31	5	59	55	غدیبر
(Adib et al.) (2017)	سرب-روی	200		235		1,879	9.5	0	50	31	30	13	56	سینجور (ده‌اصغر)
(Adib et al.) (2017)	مصلح ساختمانی	87		127		783	9	9	55	31	22	5	56	درمشور
(Adib et al.) (2017)	سرب-روی	973		7		766	9	39	53	31	31	6	56	ریگ‌کادفی
پایگاه داده‌های علوم زمین	سرب-روی	26		1,073		646	8	28	56	31	41	53	55	باقی جذب باتلر (صمت‌آباد)
(Adib et al.) (2017)	سرب-روی	482		1,346		110	4	0	39	31	0	25	56	گرچر
(Adib et al.) (2017)	سرب-روی	1,327,000		35,000		1,278,000	2.5	36	56	31	29	4	56	آب‌جدید
(Adib et al.) (2017)	سرب-روی	326		26		625	2.5	53	52	31	27	7	56	کلیچرکوه، رکنجیرکوه
(Boveiri Komari et al.) (2015)	سرب-روی	83		53		124	2.49	6	45	31	6	16	56	تپه سیرخ
(چوشتیور و همکاران) (۱۳۹۶)	سرب-روی	555		154		3,045,000	1.96	0	58	31	0	54	55	اصمدآباد
پایگاه داده‌های علوم زمین	سرب-روی	1,295		873		4,437	1.37	47	43	31	28	27	56	گور دلبندان



شکل ۶- نقشه نشانه‌های معدنی با رنگ‌بندی بر پایه نمودار لگاریتمی فرکتالی C-DMBF، نشانه معدنی و کانسار آهن نسبت به گسل‌های پی‌سنگی استخراج شده از نقشه‌های مغناطیسی هواپردی با وضوح ۵۰۰ متر.

۶- نتیجه‌گیری

بنابراین بر پایه نتایج نمودارهای لگاریتمی به دست آمده، گسل‌های پی‌سنگی که در نقشه مغناطیسی دیده می‌شوند؛ در کمترین فاصله نسبت به کانسارهای پر عیار آهن قرار دارند. به بیان دیگر گسل‌های ژرف پی‌سنگی، عامل کنترل‌کننده ساختاری این کانسارها هستند.

بر پایه کارهای پیشین و مقایسه آن با کارهای انجام شده در این پژوهش همجواری گسل‌های وارون پی‌سنگی با معادن و تأثیر آنها بر کانه‌زایی اثبات شده است. همچنین با توجه به اینکه کانه‌زایی در این منطقه تنها در شکستگی‌های کششی رخ داده است؛ این امر می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که گسل‌های وارون، ابتدا در زمان پرکامبرین و ایجاد کافت در شرایط سکویی کم‌ژرفا (روقاره‌ای) به صورت عادی بوده‌اند. بنابراین در همین زمان، در اثر گسل‌های عادی پوسته قاره‌ای نازک شده است و مواد مذاب و سیال‌ها از راه پوسته نازک شده و شکستگی‌های کششی به سطح زمین و در میان رسوبات راه پیدا و در مکان‌های خاصی، ته‌نشست کرده‌اند و این چنین فعالیت‌های آتشفشانی زیر دریایی کم‌ژرفا رخ داده است. در زمان بسته شدن اقیانوس و در اثر فشار ورقه‌های قاره‌ای در اثر برخورد قاره‌ای، این گسل‌های عادی به گسل‌های وارون در کنار کانه آهن تبدیل شده‌اند و بدین صورت هست که کانه‌زایی آهن در ژرفای بالاتر و در زیر رسوبات چین‌خورده و حتی گسل خورده ظاهر می‌شود. از این رو می‌توان چنین دریافت که کانه‌زایی مربوط به پرکامبرین است و با تشکیل این ساختارها در زمان کافت درون قاره‌ای انطباق دارد.

نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که در این محدوده، گسل‌های سطحی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ دو بر گره بهاباد و اسفوردی، در امتداد گسل‌های پی‌سنگی هستند. همچنین با استفاده از مدل‌سازی فرکتالی عیار-فاصله از نزدیک‌ترین گسل مشخص شد که یک ارتباط مستقیم میان افزایش عیار آهن کانسارهای منطقه مورد مطالعه با کاهش فاصله از نزدیک‌ترین گسل وجود دارد. این مسئله می‌تواند به عنوان یک کلید اکتشافی در این منطقه و مناطق مشابه استفاده شود. با توجه به مقادیر عیار معادن از باختر به خاور محدوده مورد مطالعه، از عیار عنصر آهن کاسته می‌شود. به این ترتیب مقادیر عیار بالای آهن تنها در محدوده بر گره ۱:۱۰۰،۰۰۰ زمین‌شناسی اسفوردی به‌ویژه در باختر و شمال باختر و مرکز (با تمرکز بسیار بالا و عیار بیش از ۵۵ درصد) و در خاور و جنوب خاور با تمرکز متوسط تا بالا (۳۷ تا ۵۵ درصد) است. همچنین با استفاده از روابط فرکتالی یاد شده کانسارهای سنگ آهن منطقه به خوبی دسته‌بندی شدند.

با توجه به اینکه جامعه آخر در نمودار C-DMJ با عیارها میان دو حد آستانه عیاری ۵۵ و ۶۰ درصد در حد فاصل میان ۱۷۷۸ تا ۲۳۴۴ متر فاصله نسبت به درزه‌های اصلی، نمودار C-DGF با عیارهای میان دو حد آستانه عیاری ۴۳ و ۶۰ درصد در فاصله‌های میان ۳۱۶۲ تا ۳۶۶۵ متر فاصله نسبت به گسل‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ بر گره‌های بهاباد و اسفوردی و در نمودار C-DMBF با عیارهای میان دو حد آستانه عیاری ۵۵ و ۶۰ در حد فاصل میان ۱ تا ۱۰۰۰ متر نسبت به گسل‌های ژرف پی‌سنگی قرار دارند؛

کتابکاری

- آذرآئین، ح. و آفتابی، ع.، ۱۳۸۳- ارتباط سازند سولفید نوار (BSF) با سازند آهن نواری (BIF) در منطقه معدنی بافق، مجموعه مقالات بیست و سومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- آرین، م.، ۱۳۹۰- زمین‌ساخت‌های پی‌سنگ و زمین‌شناسی ایران، انتشارات آثار نفیس، ۳۰۰ ص.
- افضل، پ.، ۱۳۸۹- ارایه مدل جداسازی زون‌های گوناگون کانسارهای پورفیری با روش‌های فرکتال سه‌بعدی، مطالعه موردی کانسار مس پورفیری کهنک اصفهان، رساله دکترا زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۱۹۰ ص.
- افضلی، س.، نظافتی، ن.، قادری، م.، قلمقاش، ج.، قاسمی، م.ر. و کریمی باوندپور، ع.، ۱۳۹۰- سنگ‌زایی و کانه‌زایی در کانسار اکسید آهن آپاتیت‌دار گزستان، خاور بافق، ایران مرکزی، مقاله علوم زمین، چاپ پاییز ۹۳، سال بیست و چهارم، شماره ۹۳، ص. ۷۷ تا ۸۴.
- بهزادی، م.، ۱۳۸۵- کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژئز کانسار آهن آنومالی شمالی واقع در منطقه بافق یزد، رساله دکترا، دانشگاه شهید بهشتی.

- جوانشیر، ع. ر.، راستاد، ا. و ربانی، ا. ر.، ۱۳۸۶- رخساره‌های کانه دار کانسار روی- سرب (مولیدن) احمدآباد، شمال خاور بافق و مقایسه آن با کانسار بلایرنگ (Bleiberg) در آلپ، مجله علوم زمین، بهار ۸۸ سال هجدهم، شماره ۷۱، ص. ۶۹ تا ۸۰.
- رجبی، ع. ۱۳۸۷- زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، ژئوشیمی و ژنز کانسار روی- سرب چاه میر، جنوب بهاباد (استان یزد)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- سپهری‌راد، ر.، ۱۳۷۹- زمین‌شناسی اقتصادی کانسار آهن آنومالی شمالی، چغارت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- سهیلی، م. و مهدوی، م.، ۱۳۷۰- نقشه زمین‌شناسی اسفوردی، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور.
- فضلی‌خانی، ت. و سپهری‌راد، ر.، ۱۳۹۱- گزارش تکمیلی تخمین و ارزیابی ذخیره کانسار آهن و فسفات (آپاتیت) گزستان، آرشیو گزارشات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- کارگران بافقی، ف.، ۱۳۸۰- مطالعه زون‌های فسفات‌دار در کانسار آهن چغارت و ارتباط احتمالی آنها با زون‌های فسفات‌دار کانسار اسفوردی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- پایگاه داده‌های علوم زمین (WWW.Ngdir.ir)، گزارش سازمان زمین‌شناسی.
- مهدوی، م.، ۱۳۷۵- نقشه زمین‌شناسی ایران، ورقه بهاباد، شماره ۷۲۵۳، مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- یوسفی‌فر، س.، ۱۳۹۰- زمین‌شناسی اقتصادی کانسار مس - طلا دالی (استان مرکزی) (رساله دکترای زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۲۱۱ ص.

References

- Adib, A., Mirzaei Ilani, Sh., Shoaiei, Gh. and Afzal, P., 2017- Determination of a Conceptual Model for the Structural Features and Pb –Zn Mineralization in the North of Behabad Fault Zone, Central Iran, Iranian Journal of Earth Sciences, Pages 168-183.
- Afzal, P., Ahmadi, K. and Rahbar, K., 2017- Application of fractal-wavelet analysis for separation of geochemical anomalies. Journal of African Earth Sciences 128, 27-36.
- Agterberg, F. P., Cheng, Q., Brown, A. and Good, D., 1996- Multifractal modeling of fractures in the Lac du Bonnet Batholith, Manitoba. Comput. Geosci. 22, 5, 497-507.
- Bolviken, B., Stokke, P. R., Feder J. and Jossang, T., 1992- The Fractal Nature of Geochemical Landscapes, J. Geochem. Explor., Vol. 43, pp 91–109.
- Boveiri Konari, M. Rastad, E. Mohajjel, M. Nakini, A. and Haghdoost, M., 2015- Texture, structure, mineralogy and genesis of sulphide ore facies at Tappehsorkh detrital – carbonate hosted Zn – Pb – (Ag) deposit, South of Esfahan. Iranian Scientific Quarterly Journal of Geoscience 25(97): 221-236 (in Persian).
- Cheng, Q., Agterberg, F. P. and Ballantyne, S. B., 1994- The Separation of Geochemical Anomalies from Background by Fractal Method, J. Geochem. Explor., Vol. 51, pp 109–130.
- Craw, D. and Campbell, J. R., 2004- Tectonic and Structural Setting for Active Mesothermal Gold Vein Systems, Sothern Alps, New Zealand, J. Struct. Geol., Vol. 26, pp 995-1005.
- Daliran, F., 2002- Kiruna type iron oxide-apatite ores and apatites of the Bafq district, Iran, with an emphasis on the REE geochemistry of their apatites; in Porter, T.M., ed., Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits: A global perspective, v. 2 , PGC Publishing, Adelaide, p. 303-320
- Daliran, F., Stosch, H. G. and Williams, P., 2007- Multistage metasomatism and mineralization at hydrothermal Fe oxide-REE-apatite deposits and “apatites” of the Bafq District, Central-East Iran, in: Andrew, C.J. et al., eds, Digging Deeper, Proceedings of the 9th Biennial SGA Meeting, Dublin, Irish Assoc. Econ. Geol., p. 1501.
- Daliran, F., Stosch, H. G. and Williams, P., 2010- Early Cambrian iron oxide-apatite-REE (U) deposits of the Bafq district, east-central Iran, in: Corriveau, L., Mumin, H., eds., Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues: Geol. Assoc. Canada, Short Course Notes 20, p.143-155.
- Drew, L. J., 2006- A Tectonic Model for the Spatial Occurrence of Porphyry Copper and Polymetallic Vein Deposits- Applications to Central Europe, Scientific Investigation Report, USGS, pp 1-36.
- Forster, H. and Jafarzade, A., 1994- The Bafq mining district in Central Iran- a highly mineralized Infracambrian volcanic field, Economic Geology, v. 89, p. 1697-1721.
- Ghavami-Riabi, R., 2007- Geochemical Exploration of Base Metal Massive Sulphide Deposits in the Eastern Part of Namaqua Province and Environmental South Africa; PhD Dissertation; Pretria university
- Hassanpour, S. and Afzal, P., 2013- Application of concentration–number (C–N) multifractal modeling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran, Arab. J. Geosci., Vol. 6, pp 957-970
- Hassanzadeh, J., Stockli, D. F., Horton, B. K., Axen, G. J., Stockli, L. D., Grove, M., Schmitt, A. K. and Walker, J. D., 2008- U-Pb geochronology of late Neoproterozoic-Early Cambrian granitoids in Iran: Implications for Paleogeography, magmatism, and exhumation history of Iranian basement, Tectonophysics, 451: 71-96.
- Heidarian, H., Alirezaei, S. and Lentz, D. R., 2017- Chadormalou Kiruna-type magnetite-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights into hydrothermal alteration and petrogenesis from geochemical, fluid inclusion, and sulfur isotope data. Ore Geology Reviews 83, 43-62.
- Huckriede, R., Kursten, M. and Venzlaff, H., 1962- Zur geologie des gebiets zwischen Kerman und Saghand (Iran): Beihefte zum Geologischen Jahrbuch, 51: 197.

- Jami, M., 2006- Geology, geochemistry and evolution of the Esfordi phosphate iron deposit, Bafq area, Central Iran, Unpublished PhD thesis, University of New South Wales, 355 p.
- Jami, M., Dunlop, A. C. and Cohen D. R., 2007- Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran, *Economic Geology*, v.102, p. 1111-1128.
- Khalajmasoumi, M., Sadeghi, B., Carranza, E. J. M. and Sadeghi, M., 2016- Geochemical anomaly recognition of rare earth elements using multi-fractal modeling correlated with geological features, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, in press.
- Li, C., Ma, T. and Shi, J., 2003- Application of a Fractal Method Relating Concentrations and Distances for Separation of Geochemical Anomalies from Background. *J. Geochem. Explor.*, Vol. 77, pp 167-175.
- Mandelbrot, B. B., 1983- *The Fractal Geometry of Nature (Updated and Augmented Edition)*. W.H. Freeman, San Francisco, CA.
- Meng, X. and Zhao, P., 1991- Fractal Method for Statistical Analysis of Geological Data, *Chinese J. Geosci.*, Vol. 2, pp 207-211.
- Mohseni, S. and Aftabi, A., 2015- Structural, textural, geochemical and isotopic signatures of synglaciogenic Neoproterozoic banded iron formations (BIFs) at Bafq mining district (BMD), Central Iran: The possible Ediacaran missing link of BIFs in Tethyan metallogeny. *Ore Geology Reviews*. Pages 215-236.
- Mokhtari, M. A. A. and Ebrahimi, M., 2015- Geology and Geochemistry of Homeijan Magnetite- Apatite Deposit (SW Behabad, Yazd province). *Geochemistry journal*. pp 20-27.
- Nabatian, Gh., Rastad, E., Neubauer, F., Honarmand, M. and Ghaderi, M., 2015- Iron and Fe Mn mineralisation in Iran: implications for Tethyan metallogeny. *Australian Journal of Earth Sciences. An International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia*. 62:2, 211-241, DOI: 10.1080/08120099.2015.1002001.
- Nadimi, A., 2006- Evolution of the Central Iranian basement, *Gondwana Research*, 1-10 p.
- Nouri, R., Jafari, M., Arain, M., Feizi, F. and Afzal, P., 2013- Correlation Between Cu Mineralization and Major Faults Using Multifractal Modeling in Tarom Area, NW Iran, *Geol. Carpath.*, 64, 5, 409 - 416.
- Rahimi, E., Maghsoudi, A. and Hezarkhani, A., 2016- Geochemical investigation and statistical analysis on rare earth elements in Lakehsiyah deposit, Bafq district. *Journal of African Earth Sciences* 124, 139-150.
- Rajabi, A., Rastad, E., Alfonso, P. and Canet, C., 2012- Geology, ore facies and sulfur isotopes of the Koushk vent-proximal sedimentary-exhalative deposit, Posht-e-Badam block 1504.
- Ramezani, J. and Tucker, R., 2003- The Saghand region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American Journal of Science*, 303: 622-665.
- Sadeghi, B., Moarefvand, P., Afzal, P., Yasrebi, A. B. and Daneshvar Saein, L., 2012- Application of fractal models to outline mineralized zones in the Zaghia iron ore deposit, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*. v. 122, pp 9-19.
- Samani, B. A., 1988- Metallogeny of the Precambrian in Iran. *Precambrian Res.*; 39, 85-106. Talbot, C. J. and Alavi, M., 1996- The past of a future syntaxis across the Zagros, in Alsop, G. I., Blundell, D. J., and Davison, I., editors, *Salt Tectonics: Geological Society Special Publications*, 100: 89-109.
- Talbot, C. J. and Alavi, M., 1996- The past of a future syntaxis across the Zagros, in Alsop, G. I., Blundell, D. J., and Davison, I., editors, *Salt Tectonics: Geological Society Special Publications*, 100: 89-109.
- Turcotte, D. L., 1986- A Fractal Approach to the Relationship between Ore Grade and Tonnage. *Econ. Geol.*, Vol. 18, pp 1525-1532.
- Wang, W., Zhao, J., Cheng, Q. and Liu, J., 2012- Tectonic-Geochemical Exploration Modeling for Characterizing Geo-Anomalies in Southeastern Yunnan District, China, *J. Geochem. Explor.*, Vol. 122, pp 71-80.

The relationship between Fe mineralization and the basement linear structures using multifractal modelling in the Bafgh area, Central Iran

M. Nabilou¹, M. Arian^{2*}, P. Afzal³, A. Adib⁴ and A. Kazemi Mehrnia⁵

¹Ph.D. Student, Earth Sciences, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

²Professor, Earth Sciences, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

³Associate Professor, Department of Mining Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran

⁴Associate Professor, Department of Oil Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran

⁵Assistant Professor, Islamic Azad University, Mahalat Branch, Markazi Province, Iran

Received: 2017 March 15

Accepted: 2017 June 19

Abstract

The multifractal modelling is an effective approach for separation of geological and mineralized zones from the background. Following cases are addressed in this study; Concentration-Distance to Major Fault structures (C-DMF) fractal model and distribution of the known Fe indices/mines in the Bafgh area to distinguish the Fe mineralization based on their distance to basement faults, surface faults and master joints, using remote sensing information, airborne geophysics information and field surveys. Application of the C-DMF model for the classification of Fe mineralization in the Esfordi and Behabad 1: 100,000 sheets reveals that the main Fe mineralizations have a strong correlation with their distance to the major and basement faults. Accordingly, the distances of Fe mineralization that has the grades upper than 55% in this area ($43\% \leq S \leq 60\%$), are lower than 1 km related to basement faults, while such distance for this threshold is $2344 < DMJ \leq 1778$ meter for the master joint and also for the faults of 1:100,000 Behabad and Esfordi geology sheets in $43\% \leq S \leq 60\%$ threshold (for the grades) the distances are $3162 < DGF \leq 4365$ meter to the faults. This indicates a positive correlation between Fe mineralization and distance to the basement faults. On the other words, the proximity evidence for the Precambrian high grades Fe deposits related to basement faults indicates syn-rifting tectonic events. This C-DMF fractal model can be used in exploration of the magmatic and hydrothermal ore deposits.

Keywords: Multifractal model, Concentration-Distance to Major Fault (C-DMF), Iron (Fe) mineralization, Esfordi, Bafgh.

For Persian Version see pages 181 to 190

*Corresponding author: M. Arian; E-mail: mehranarian@yahoo.com