فصلنامه زمین‌ساخت

تابستان ۱۴۰۵، سال هشتم، شماره ۳۰

10.22077/jt.2026.11108.1224

مقاله پژوهشی

نقش تکامل ساختاری پهنه‌های برشی زون سیستان در کنترل جایگیری، تمرکز و بازآرایی کانی‌سازی مس VMS تیپ قبرس در منطقه کوه‌خیری، شرق ایران

فاطمه شبانی[۱]، سیداحمد مظاهری[۲*]، امیر مهدوی[۳]

۱. دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲. استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳. استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۴

چکیده:

منطقه کوه‌خیری در جنوب‌غرب سربیشه و بخش مرکزی زون زمین‌درز سیستان در خاور ایران واقع شده و میزبان کانی‌سازی مس در توالی‌های آتشفشانی مافیک تا حدواسط کرتاسه بالایی است. این پژوهش با تلفیق داده‌های زمین‌شناسی صحرایی، ساختاری، پتروگرافی، کانه‌نگاری، دگرسانی و لاگ‌های حفاری، نقش دگرشکلی شکننده را در تمرکز و بازآرایی کانه‌زایی بررسی می‌کند. تحلیل‌های ساختاری نشان می‌دهد گسل‌ها و پهنه‌های برشی با روند غالب NW-SE، در اثر بازفعال‌شدن و افزایش موضعی نفوذپذیری، مسیرهای ترجیحی گردش سیالات را ایجاد کرده و بازآرایی کانه‌زایی اولیه را کنترل کرده‌اند. تمرکز کانه‌زایی در مجاورت هسته چین‌های کم‌شیب و محل تقاطع پهنه‌های برشی، نقش هم‌زمان چین‌خوردگی، شکستگی و تمرکز کرنش را در توزیع زون‌های کانه‌دار نشان می‌دهد. کانی‌سازی هیپوژن عمدتاً شامل پیریت ± کالکوپیریت در بافت‌های استوک‌ورکی، رگه-رگچه‌ای و پراکنده، همراه با دگرسانی کلریتی-اپیدوتی-کربناته است و با زون تغذیه یک سامانه VMS مس‌غالب تیپ قبرس سازگاری دارد. داده‌های ژئوشیمی چندعنصری شامل ۰,۰۰۳ تا ۳,۰۹۴ درصد مس، ۲۷ تا ۱,۰۲۳ پی‌پی‌ام روی، کمتر از ۱ تا ۸۲ پی‌پی‌ام سرب، ۲,۷۸ تا بیش از ۱۰ درصد آهن و ۸۳ تا ۳,۴۷۴ پی‌پی‌ام منگنز است. غنی‌شدگی سوپرژن با کالکوسیت ± کوولیت و مس طبیعی و زون اکسیدان با مالاکیت، آزوریت و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز مشخص می‌شود. شواهد ساختاری و کانه‌شناسی نشان می‌دهد معماری اولیه سامانه VMS طی تکامل برخوردی زون سیستان بر اثر برش‌خوردگی، جابه‌جایی بلوکی و بازتوزیع کانه‌زایی دگرگون شده است. بنابراین، همراهی پهنه‌های برشی بازفعال‌شده، استوک‌ورک‌های پیریت-کالکوپیریت و دگرسانی کلریتی-اپیدوتی-کربناته می‌تواند شاخص اکتشافی مؤثری برای سامانه‌های VMS دگرشکل‌یافته در کمربندهای افیولیتی-برخوردی باشد.

کلیدواژه‌ها: زون زمین‌درز سیستان؛ کوه‌خیری؛ پهنه‌های برشی؛ کنترل ساختاری کانه‌زایی؛ کانسار VMS تیپ قبرس

*ایمیل: mazaheri@um.ac.ir
تلفن تماس: ۰۹۱۵۳۱۵۶۷۰۳

Research Paper

Structural Evolution of Shear Zones and Their Control on the Emplacement, Localization, and Structural Reworking of Cyprus-Type VMS Copper Mineralization in the Kuh-Kheiri Area, Sistan Suture Zone, Eastern Iran

Fatemeh Shabani[1], Seyed Ahmad Mazaheri [2*], Amir Mahdavi[3]

[1] Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

[2] Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

[3] Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

The Kuh-Kheiri area, located southwest of Sarbisheh in the central Sistan Suture Zone, eastern Iran, hosts copper mineralization within Upper Cretaceous mafic to intermediate volcanic sequences. This study integrates field geological and structural data, petrography, ore microscopy, alteration studies, and drill-core logging to investigate the role of brittle deformation in the localization and structural reworking of mineralization. Structural analyses indicate that predominantly NW–SE-trending faults and shear zones, through reactivation and localized enhancement of permeability, provided preferential pathways for fluid flow and controlled the reworking of primary mineralization. Mineralization is preferentially concentrated near the hinges of gently inclined folds and at shear-zone intersections, indicating the combined influence of folding, fracturing, and strain localization on the distribution of mineralized zones. Hypogene mineralization consists mainly of pyrite ± chalcopyrite in stockwork, vein–veinlet, and disseminated textures, associated with chlorite–epidote–carbonate alteration, consistent with the feeder zone of a Cu-dominant Cyprus-type VMS system. Multi-element geochemical data show 0.003–3.094 wt.% Cu, 27–1,023 ppm Zn, <1–82 ppm Pb, 2.78 to >10 wt.% Fe, and 83–3,474 ppm Mn. Supergene enrichment is characterized by chalcocite ± covellite and native copper, whereas the oxidation zone contains malachite, azurite, and Fe–Mn oxides and hydroxides. Structural and mineralogical evidence indicates that the original VMS architecture was modified during the collisional evolution of the Sistan Suture Zone through shearing, block displacement, and redistribution of mineralization. Therefore, reactivated shear zones associated with pyrite–chalcopyrite stockworks and chlorite–epidote–carbonate alteration provide effective exploration criteria for deformed VMS systems in ophiolitic–collisional belts.

Keywords: Sistan Suture Zone; Kuh-Kheiri; Shear zones; Structural controls on mineralization; Cyprus-type VMS deposit.

*Email: mazaheri@um.ac.ir
Tel: +989153156703

۱. مقدمه

کانسارهای ماسیوسولفید ولکانوژنیک[1] از مهم‌ترین منابع جهانی مس و فلزات پایه به شمار می‌روند که در اثر گردش سیالات گرمابی در ارتباط با فعالیت‌های آتشفشانی زیردریایی و در محیط‌های کششی تا نیمه‌کششی تشکیل می‌شوند (Franklin et al., 1981; Galley et al., 2007; Hannington et al., 2011). در میان انواع مختلف این کانسارها، تیپ قبرس به‌طور شاخص با پوسته اقیانوسی مافیک، توالی‌های بازالتی تولئیتی، دگرسانی غالب کلریتی و کانی‌سازی غنی از مس همراه با فقر نسبی روی و سرب شناخته می‌شود (Moores & Vine, 1971; Franklin et al., 1981; Galley et al., 2007). با این حال، در کمربندهای برخوردی، این سامانه‌ها معمولاً تحت تأثیر دگریختی‌های چندمرحله‌ای، برش‌خوردگی، جابه‌جایی‌های بلوکی و فرآیندهای سوپرژن قرار گرفته و هندسه، پیوستگی و ویژگی‌های کانی‌شناسی آن‌ها به‌طور قابل‌توجهی دگرگون و بازآرایی می‌شود (Galley et al., 2007; Hannington et al., 2011). در چنین محیط‌هایی، پهنه‌های برشی ناحیه‌ای نه‌تنها مسیرهای اصلی انتقال سیالات متأخر را فراهم می‌کنند، بلکه در بازفعال‌سازی ساختارهای پیشین، بازآرایی، تمرکز مجدد و غنی‌شدگی ثانویه کانه‌زایی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کنند (Sillitoe, 2005).

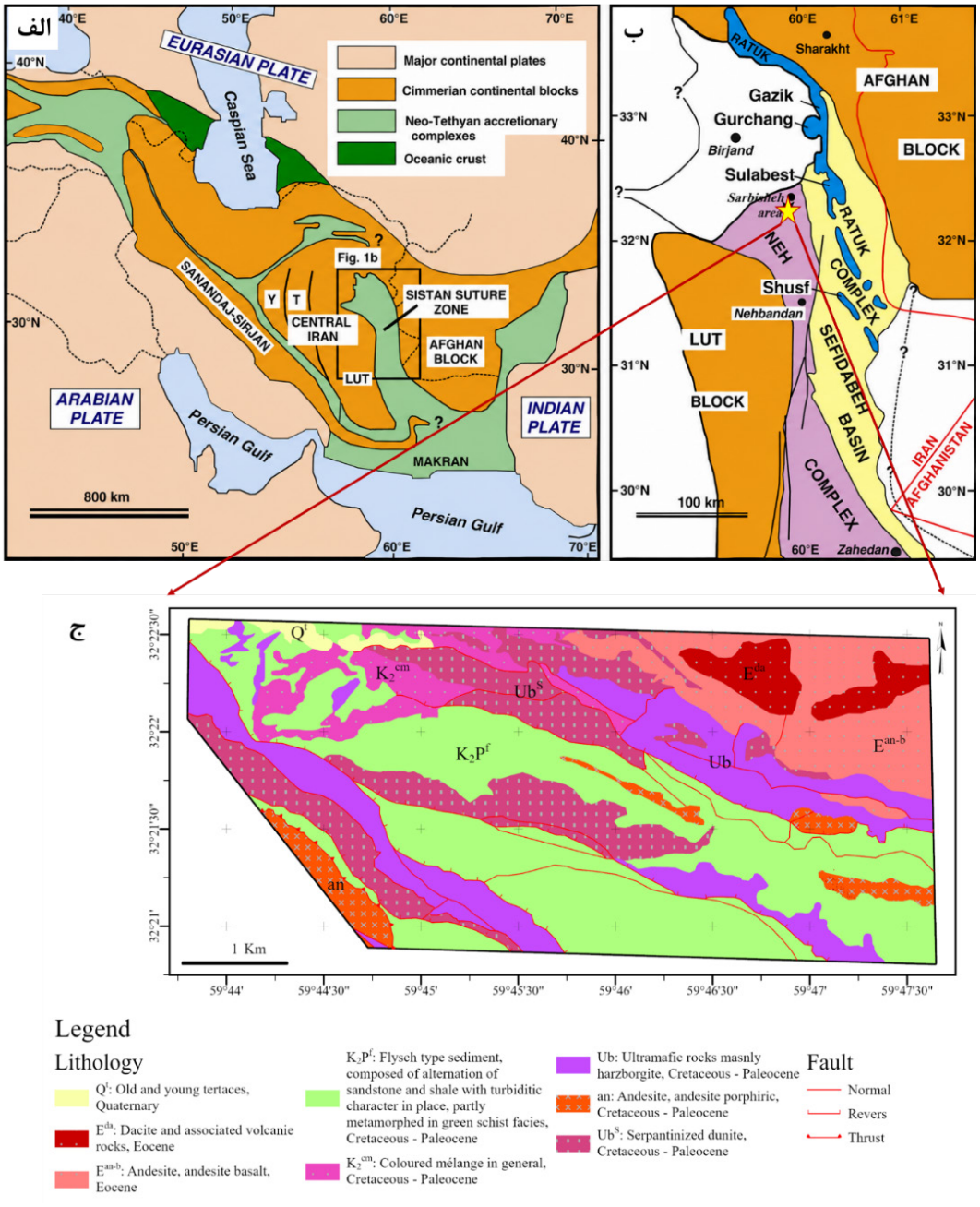
زون زمین‌درز سیستان در شرق ایران، به‌عنوان بازمانده یک حوضه اقیانوسی نئوتتیس جوان میان بلوک‌های لوت و افغان، حاصل فرایندهای گسترش بستر اقیانوسی، فرورانش، بسته‌شدن حوضه و برخورد قاره‌ای در فاصله زمانی کرتاسه پسین تا ائوسن است (Stocklin, 1974; Tirrul et al., 1983; Jentzer et al., 2022). این زون با حضور مجموعه‌های افیولیتی، توالی‌های آتشفشانی مافیک و شبکه‌ای از گسل‌ها و پهنه‌های برشی عمدتاً با روندهای N–S و NW–SE مشخص می‌شود که نقش مهمی در تکامل ساختاری و متالوژنی آن ایفا کرده‌اند (Tirrul et al., 1983; Angiboust et al., 2013; Jentzer et al., 2022) (شکل ۱).

منطقه کوه‌خیری در جنوب‌غرب سربیشه، واقع در محدوده کمپلکس افیولیتی–ولکانیکی نِه و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سهل‌آباد، بخشی از این زون محسوب می‌شود (شکل ۱ب). سنگ‌های میزبان کانی‌سازی در این منطقه عمدتاً شامل بازالت، بازالت–آندزیت، گدازه‌های بالشی و برش‌های هیدروترمال کرتاسه بالایی هستند که ویژگی‌های سنگ‌شناسی و کانه‌زایی آن‌ها با ویژگی‌های گزارش‌شده برای سامانه‌های VMS تیپ قبرس همخوانی دارد (Tirrul et al., 1983; Zarrinkoub et al., 2012; Shirazi et al., 2022; Jentzer et al., 2022) (شکل ۱ج). مطالعات پیشین وجود مجموعه‌ای از گسل‌های با روند غالب NW–SE را در منطقه گزارش کرده‌اند (Shirazi et al., 2022).

اگرچه مطالعات پیشین بر زمین‌شناسی ناحیه‌ای، تکامل تکتونیکی زون سیستان و ویژگی‌های عمومی کانه‌زایی‌های مس تمرکز داشته‌اند (Tirrul et al., 1983; Angiboust et al., 2013; Bonnet et al., 2018; Jentzer et al., 2022; Shirazi et al., 2022)، اما با وجود این، هنوز روشن نیست که دگرشکلی‌های چندمرحله‌ای و بازفعال‌شدن پهنه‌های برشی چگونه معماری اولیه سامانه‌های VMS را دگرگون کرده و چه نقشی در بازتوزیع فضایی کانه‌زایی و تمرکز مجدد آن در زون سیستان ایفا کرده‌اند. از این‌رو، پژوهش حاضر با تلفیق داده‌های زمین‌شناسی صحرایی، تحلیل‌های ساختاری، مطالعات پتروگرافی و کانه‌نگاری و اطلاعات حفاری، یک مدل مفهومی تکامل ساختاری برای ارتباط میان تحول ساختاری و تکامل سامانه کانه‌زایی در کانسار کوه‌خیری ارائه می‌دهد. این مدل نه‌تنها درک فرایندهای بازآرایی کانسارهای VMS دگرشکل‌یافته را بهبود می‌بخشد، بلکه شاخص‌های ساختاری و زمین‌شناسی مؤثری را برای اکتشاف سامانه‌های مشابه در زون سیستان و سایر کمربندهای افیولیتی–برخوردی پیشنهاد می‌کند.

---

۱ Volcanogenic Massive Sulfide; VMS



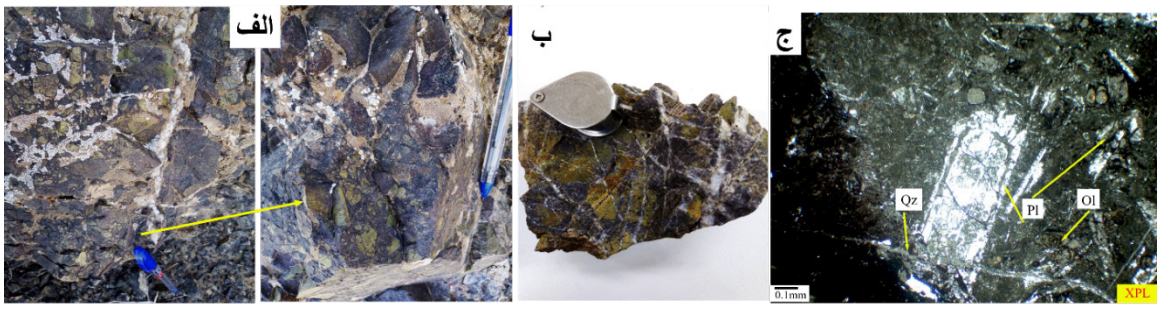
شکل ۱. الف) جایگاه زون زمین‌درز سیستان در چارچوب تکتونیکی خاورمیانه (اصلاح‌شده از Tirrul et al., 1983; Mc-Call, 1977; Stampfli et al., 2001). T: بلوک طبس؛ Y: بلوک یزد. ب) زیرتقسیمات اصلی زون زمین‌درز سیستان و موقعیت منطقه کوه‌خیری (ستاره) در کمپلکس نِه (اقتباس از Tirrul et al., 1983). ج) نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه و موقعیت گسل‌های اصلی (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی شرکت مهندسین مشاور زمین کاوان زمان، ۱۳۹٤).

زمین‌شناسی و دگرسانی منطقه کوه‌خیری

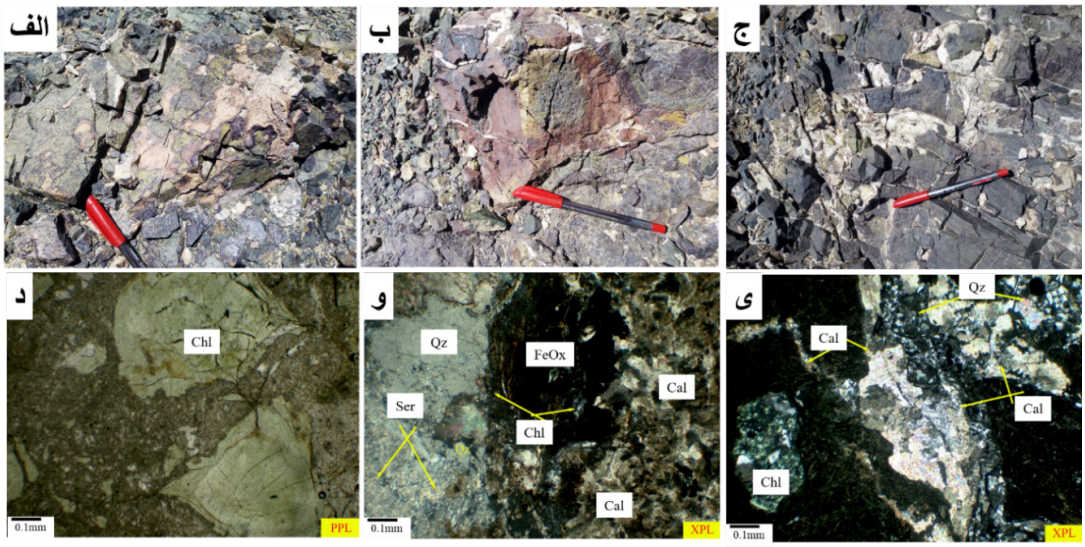
محدوده معدنی کوه‌خیری در برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سهل‌آباد (Navai, 1974) و در بخش مرکزی زون زمین‌درز سیستان واقع شده است. سنگ‌های رخنمون‌یافته عمدتاً از توالی‌های آتشفشانی مافیک تا حدواسط کرتاسه بالایی شامل بازالت، بازالت–آندزیت، گدازه‌های بالشی، برش‌های آتشفشانی، واحدهای آذرآواری، شیل‌ها، ماسه‌سنگ‌های فلیشی و رسوبات کواترنری تشکیل شده‌اند (Tirrul et al., 1983; Zarrinkoub et al., 2012) (شکل ۱ج). کانی‌سازی عمدتاً در واحدهای بازالتی و بازالت–آندزیتی متمرکز است؛ واحدهایی که بافت‌های پورفیری، میکرولیتی، هیالوپورفیری، واریولیتی و هیالوکلاستیک را به‌خوبی

حفظ کرده‌اند. حضور گسترده گدازه‌های بالشی و بافت‌های وابسته به سردشدگی سریع نیز بیانگر جایگیری این سنگ‌ها در یک محیط آتشفشانی زیردریایی است؛ ویژگی‌ای که با محیط سنگ میزبان و ویژگی‌های آتشفشانی گزارش‌شده برای سامانه‌های VMS تیپ قبرس سازگاری دارد (Franklin et al., 2005; Galley et al., 2007; Piercey, 2010) (شکل ۲). در مقیاس رخنمون، تماس میان واحدهای آتشفشانی و توالی‌های شیلی–فلیشی در بسیاری از بخش‌های محدوده به‌صورت گسلی و برشی است و با خردشدگی، برش‌خوردگی و اختلاط موضعی واحدها همراه است؛ ازاین‌رو، روابط چینه‌ای اولیه در بخش‌هایی از محدوده تحت تأثیر دگرشکلی بعدی مخدوش شده است.

سنگ‌های میزبان در سراسر منطقه تحت تأثیر دگریختی شکننده قرار گرفته و پهنه‌های خردشدگی،



شکل ۲. شواهد صحرایی، نمونه دستی و پتروگرافی از برش‌ها و سنگ میزبان دگرسان‌شده در منطقه کوه‌خیری. (الف) نمای صحرایی از برشی شامل قطعات زاویه‌دار تا نیمه‌گرد سنگ‌های آتشفشانی مافیک تا حدواسط در ماتریکس کلریتی–کربناته، همراه با رگچه‌های کربناته. (ب) نمونه دستی از برش هیدروترمال با دگرسانی کلریتی سبزرنگ و رگچه‌های کلسیتی سفید. (ج) تصویر مقطع نازک در نور پلاریزه متقاطع از سنگ میزبان بازالت–آندزیتی، شامل فنوکریست‌های نیمه‌شکل‌دار تا خودشکل پلاژیوکلاز و الیوین در زمینه‌ای ریزدانه تا شیشه‌ای، همراه با رگچه کوارتزی. Pl: پلاژیوکلاز؛ Ol: الیوین؛ Qz: کوارتز.



شکل ۳. شواهد صحرایی و میکروسکوپی دگرسانی گرمابی در منطقه کوه‌خیری. (الف–ج) نمونه‌های صحرایی از سنگ‌های میزبان دگرسان‌شده با تغییر رنگ و توسعه رگه–رگچه‌های گرمابی. (د) تصویر مقطع نازک در نور پلاریزه که جانشینی کانی‌های اولیه توسط کلریت (Chl) را نشان می‌دهد. (و) تصویر مقطع نازک در نور پلاریزه متقاطع از دگرسانی سریسیتی–کلریتی همراه با کوارتز (Qz)، کلسیت (Cal) و اکسیدهای آهن (FeOx). (ی) تصویر مقطع نازک در نور پلاریزه متقاطع از رگچه کلسیتی همراه با کلریت و کوارتز در سنگ دگرسان‌شده. مجموعه کانی‌های دگرسانی شامل کلریت، سریسیت، کلسیت، کوارتز و اکسیدهای آهن است.

کاتاکلازیت‌ها، برش‌های گسلی و برش‌های تکتونو–هیدروترمال به‌طور گسترده در امتداد شکستگی‌ها توسعه یافته‌اند. سیمان کلریتی، کربناتی، سیلیسی و اکسیدهای آهن، همراه با بافت‌های برشی–سیمانی، پرشدگی فضاهای باز و رگه‌های چندنسلی، نشان‌دهنده چندین مرحله بازشدگی شکستگی‌ها، پرشدگی فضای باز و گردش مکرر سیالات در امتداد ساختارهای شکننده است و با فعالیت چندمرحله‌ای سامانه گرمابی سازگاری دارد (شکل ۲ و ۳).

مطالعات پتروگرافی نشان می‌دهد که دگرسانی‌های کلریتی، اپیدوتی، کربناتی، سیلیسی و سریسیتی در منطقه توسعه یافته‌اند؛ بااین‌حال، مجموعه کلریت ± اپیدوت ± کربنات فراگیرترین مجموعه دگرسانی را تشکیل می‌دهد. در مقابل، دگرسانی‌های سیلیسی و سریسیتی عمدتاً به‌صورت موضعی و در امتداد شکستگی‌ها و رگه‌ها توسعه یافته‌اند. غلبه مجموعه کلریت–اپیدوت–کربنات با ویژگی‌های شناخته‌شده زون‌های تغذیه و استوک‌ورکی سامانه‌های VMS تیپ قبرس سازگار است (Large et al., 2001; Franklin et al., 2005; Galley et al., 2007; Hannington et al., 2011) (شکل ۳).

مشاهدات صحرایی و داده‌های حفاری نشان می‌دهند که بخش قابل‌توجهی از زون‌های دگرسان و کانه‌دار در امتداد یا مجاورت ساختارهای شکننده با روند غالب NW–SE و، به‌صورت فرعی، NE–SW قرار گرفته‌اند. این هم‌مکانی فضایی مبنای ارزیابی نقش بازفعال‌شدن ساختارها در کنترل نفوذپذیری، تمرکز دگرسانی و بازآرایی کانه‌زایی در بخش‌های بعدی مقاله است.

کانی‌سازی

مطالعات کانه‌نگاری بر روی ۴۵ مقطع صیقلی، در تلفیق با مشاهدات صحرایی و تفسیر لاگ‌های حفاری، امکان تفکیک کانی‌سازی منطقه کوه‌خیری را در سه مرحله اصلی فراهم می‌کند: (۱) مرحله هیپوژن، شامل پیریت ± کالکوپیریت همراه با دگرسانی کلریتی–اپیدوتی–کربناته در زون‌های استوک‌ورکی و برش‌های هیدروترمال؛ (۲) مرحله غنی‌شدگی سوپرژن، مشخص‌شده با تشکیل کالکوسیت ± کوولیت و مس طبیعی[1]، عمدتاً در امتداد شکستگی‌ها و حاشیه کانی‌های سولفیدی اولیه؛ و (۳) مرحله اکسیداسیون، شامل مالاکیت، آزوریت، هماتیت، گوتیت، لیمونیت و اکسیدهای منگنز (شکل‌های ۴ و ۵).

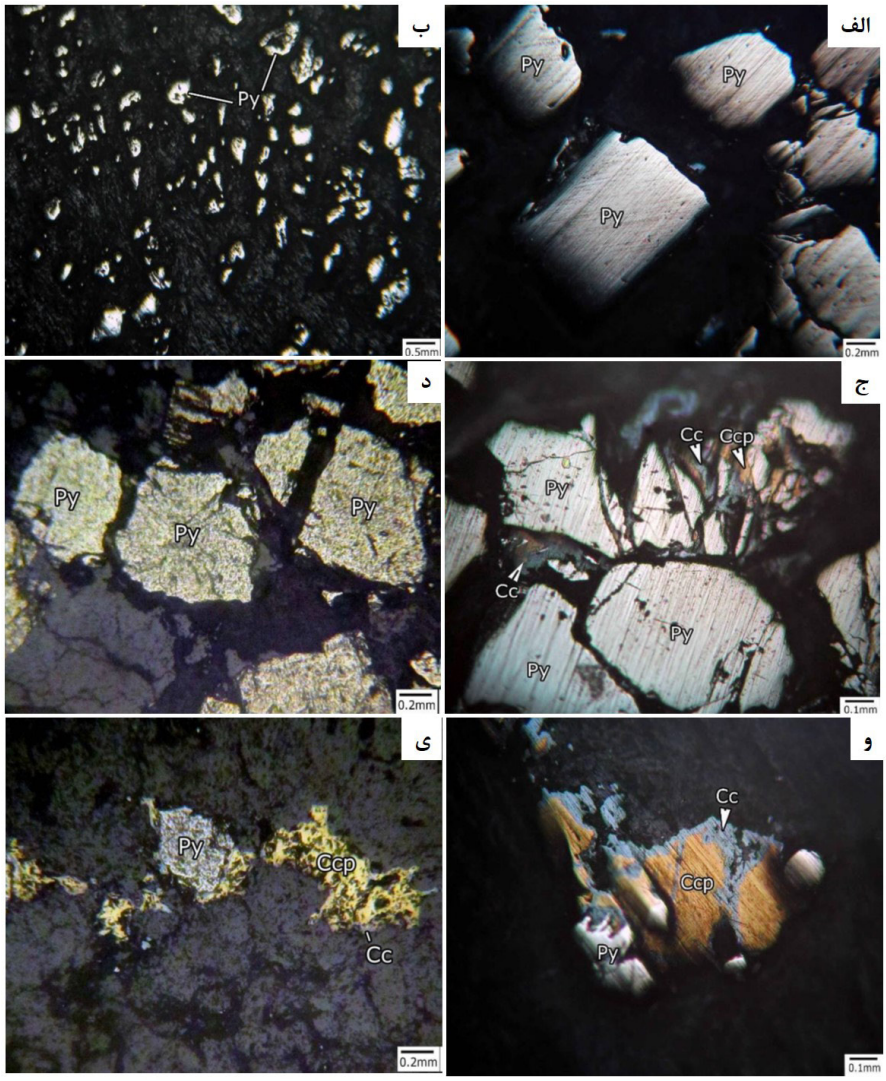
کانی‌سازی عمدتاً به‌صورت استوک‌ورکی، رگه–رگچه‌ای، جانشینی و پراکنده مشاهده می‌شود و تمرکز آن در بسیاری از رخنمون‌ها و مغزه‌های حفاری با زون‌های خردشدگی و شکستگی‌های اصلی هم‌مکان است. پیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی است و در برخی نمونه‌های کانه‌دار به‌طور موضعی فراوانی بالایی نشان می‌دهد؛ کالکوپیریت به‌صورت فرعی و معمولاً با فراوانی بسیار کمتر مشاهده می‌شود. عدسی‌های سولفیدی توده‌ای در محدوده مورد مطالعه مشاهده نشد؛ بااین‌حال، حضور استوک‌ورک‌های پیریت–کالکوپیریت، دگرسانی کلریتی–اپیدوتی–کربناته، سنگ‌های آتشفشانی مافیک زیردریایی و زون‌بندی کانه‌شناسی، با حفظ بخش‌های تغذیه یک سامانه VMS دگرشکل‌یافته سازگاری دارد.

لاگ‌های حفاری، به‌ویژه در گمانه KBH14 (شکل ۵)، زون‌بندی عمودی مشخصی را نشان می‌دهند که از افق اکسیدان غنی از Cu–Fe–Mn در بخش‌های کم‌عمق، به زون‌های سولفیدی در اعماق میانی و حضور موضعی مس طبیعی در بخش‌های عمیق‌تر تغییر می‌کند. این الگو با تغییرات کانی‌شناسی مشاهده‌شده در مقاطع صیقلی و نمونه‌های حفاری سازگار است و از وجود یک سامانه کانه‌زایی چندمرحله‌ای، شامل کانی‌سازی هیپوژن، غنی‌شدگی سوپرژن و اکسیداسیون متأخر، پشتیبانی می‌کند. این زون‌بندی با الگوهای گزارش‌شده برای سامانه‌های VMS مس‌غالب تیپ قبرس سازگاری دارد (Franklin et al., 2005; Hannington et al., 2011).

ویژگی‌های ژئوشیمیایی کانی‌سازی

به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های کلّی ترکیب فلزی کانی‌سازی و فراهم کردن شواهد ژئوشیمیایی

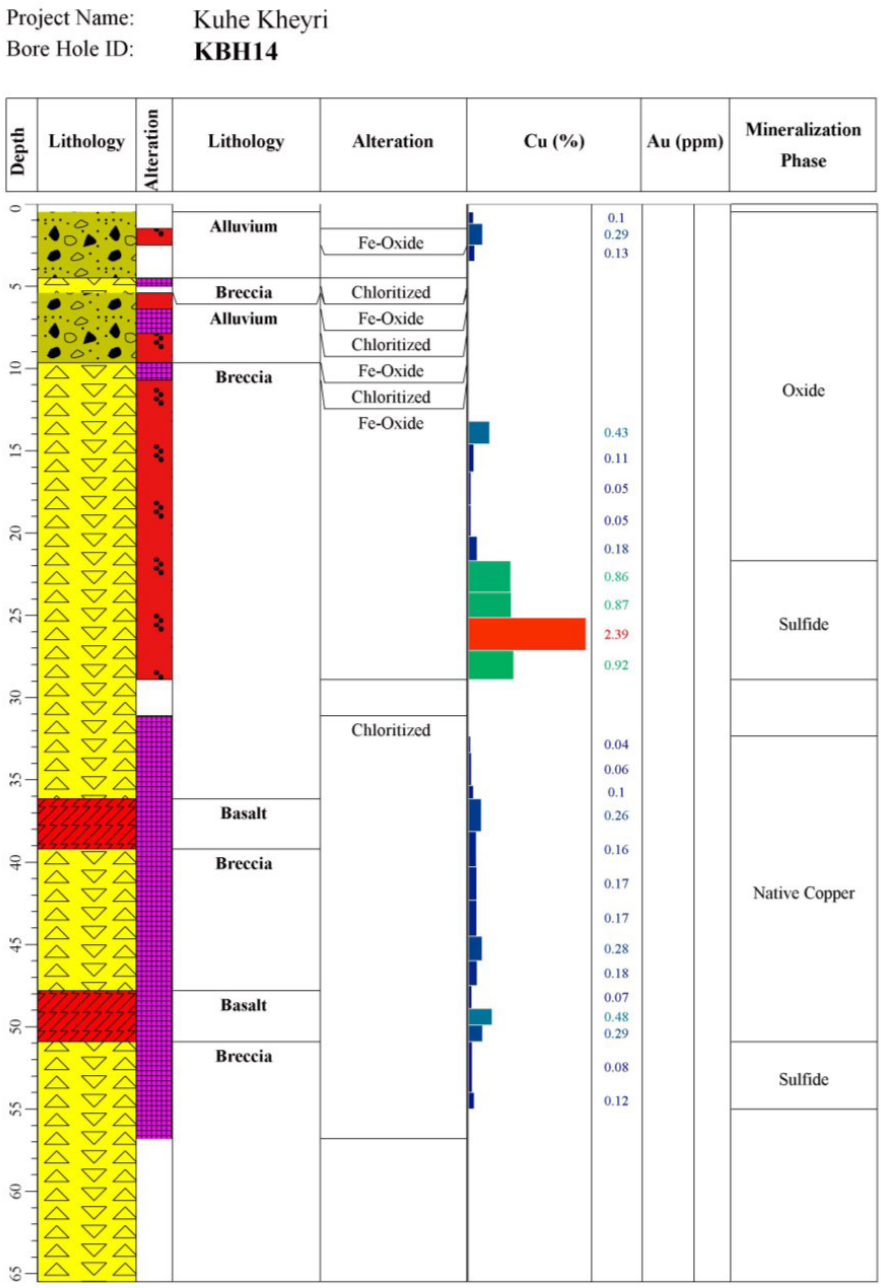
۱ Native Copper



شکل ٤. تصاویر کانه‌نگاری از مراحل مختلف کانی‌سازی در منطقه کوه‌خیری. (الف–ب) دانه‌های نیمه‌خودشکل تا خودشکل پیریت (Py) به‌صورت پراکنده در سنگ میزبان دگرسان‌شده. (ج–و) همزیستی پیریت (Py)، کالکوپیریت (Ccp) و کالکوسیت (Cc)، حضور کالکوسیت در امتداد شکستگی‌ها و حاشیه‌های کالکوپیریت نشان‌دهنده جانشینی ثانویه موضعی کالکوپیریت در مرحله غنی‌شدگی سوپرژن است.

پشتیبان برای تفسیر سامانه کانه‌زایی، نتایج آنالیز چندعنصری ۴۳ نمونه مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر مس در محدوده ۰,۰۰۳ تا ۳,۰۹۴ درصد، روی از ۲۷ تا ۱,۰۲۳ پی‌پی‌ام، سرب از کمتر از ۱ تا ۸۲ پی‌پی‌ام، آهن از ۲,۷۸ تا بیش از ۱۰ درصد و منگنز از ۸۳ تا ۳,۴۷۴ پی‌پی‌ام تغییر می‌کند. این داده‌ها به‌طور کلّی نشان‌دهنده غلبه نسبی مس و آهن در کنار مقادیر پایین‌تر روی و سرب هستند؛ الگویی که در تلفیق با سنگ میزبان آتشفشانی مافیک، استوک‌ورک‌های پیریت–کالکوپیریت و دگرسانی غالب کلریتی–اپیدوتی–کربناته، با ویژگی‌های سامانه‌های VMS مس‌غالب تیپ قبرس سازگاری دارد (Franklin et al., 2005; Galley et al., 2007; Hannington et al., 2011).

در مقاله حاضر، داده‌های ژئوشیمیایی صرفاً به‌عنوان شواهد پشتیبان برای مشخص‌کردن ویژگی کلّی کانی‌سازی و ارزیابی آن در چارچوب زمین‌شناسی و ساختاری منطقه



شکل ۵. لاگ تلفیقی لیتولوژی، دگرسانی، عیار Cu و فاز کانی‌سازی در گمانه KBH14. بیشینه عیارهای Cu عمدتاً در بازه‌های برشی و دگرسان‌شده متمرکز است. زون‌بندی عمودی شامل افق اکسیدان در بخش‌های کم‌عمق، گذار به کانی‌سازی سولفیدی در اعماق میانی، و حضور موضعی مس طبیعی در بخش‌های عمیق‌تر است. این الگو نشان‌دهنده ارتباط فضایی کانی‌سازی با واحدهای برشی و دگرسان‌شده در مقیاس گمانه است.

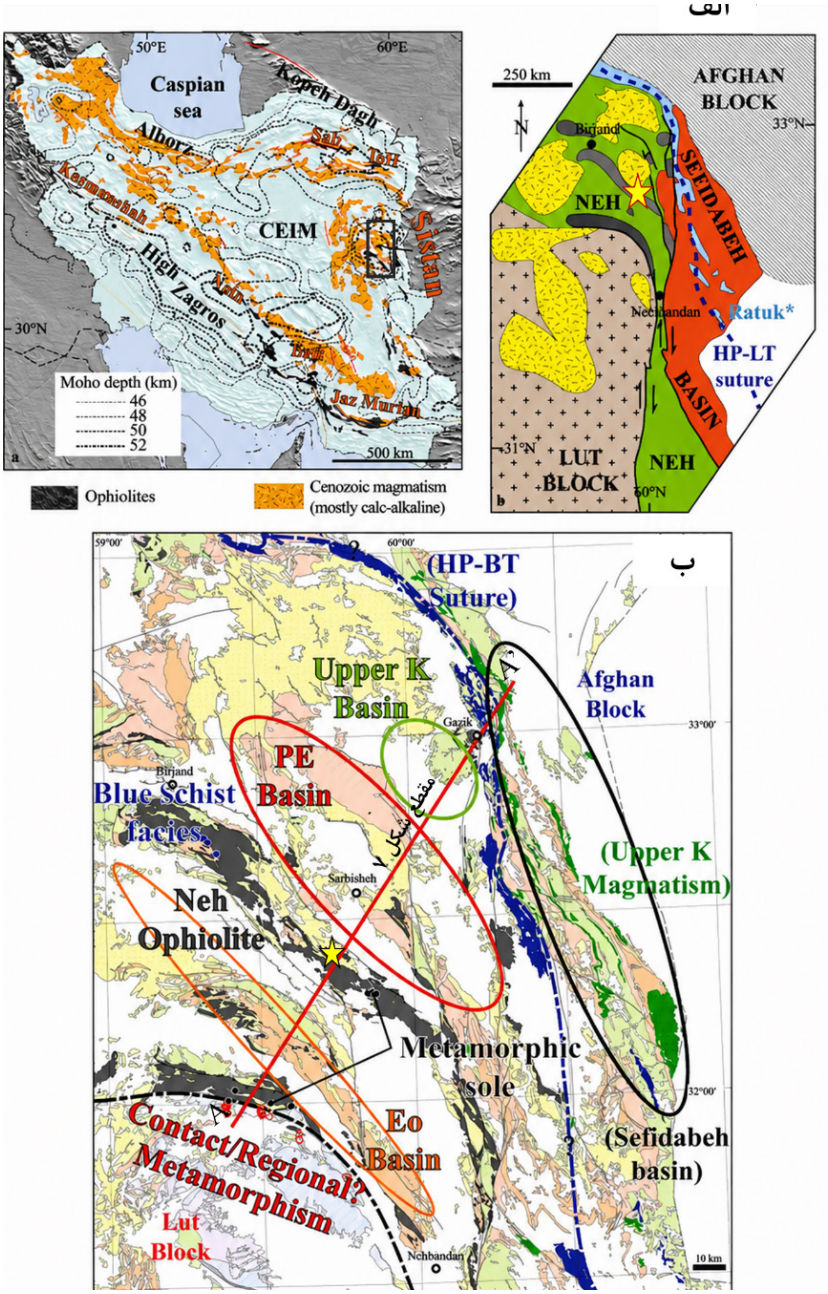
به‌کار گرفته شده‌اند؛ ازاین‌رو، تحلیل تفصیلی تغییرات ژئوشیمیایی، همبستگی عناصر و مدل‌سازی ژئوشیمیایی خارج از دامنه مقاله حاضر است.

۲. تحولات ساختاری زون سیستان

۲-۱. چارچوب ساختاری ناحیه‌ای

زمین‌درز سیستان[۱] یک کمربند برخوردی–برشی با روند غالب شمالی–جنوبی و طولی نزدیک به ۷۰۰ کیلومتر در

۱ Sistan Suture Zone; SSZ



شکل ٦. چارچوب زمین‌ساختی زون زمین‌درز سیستان و جایگاه کانسار مس کوه‌خیری در مقیاس ناحیه‌ای. (الف) جایگاه زون زمین‌درز سیستان در چارچوب تکتونیکی ایران و نئوتتیس (چپ)، شامل پراکندگی افیولیت‌های مزوزوئیک، ماگماتیسم سنوزوئیک و تغییرات عمق ناپیوستگی موهو در ایران مرکزی، همراه با مدل شماتیک معماری کلّی زون سیستان (راست) که موقعیت بلوک لوت، بلوک افغان، کمپلکس نِه (NEH)، حوضه سفیدآبه، زون دگرگونی فشاربالا–دمای پایین (HP–LT) و پهنه‌های برشی اصلی را نشان می‌دهد. ستاره، موقعیت تقریبی کانسار مس کوه‌خیری را مشخص می‌کند. (ب) نقشه زمین‌شناسی–ساختاری بخش شمالی زون زمین‌درز سیستان که واحدهای افیولیتی، رسوبات کرتاسه و پالئوژن، کمپلکس دگرگونی، حوضه‌های رسوبی و ساختارهای اصلی حاصل از تکامل برخوردی را نشان می‌دهد. محل کانسار کوه‌خیری (ستاره زرد) در بخش مرکزی کمپلکس افیولیتی نِه و در امتداد یکی از پهنه‌های اصلی تمرکز کرنش قرار گرفته است. این موقعیت بیانگر ارتباط مستقیم کانسار با سامانه ساختاری حاصل از فرورانش، فرارانش، برخورد قاره‌ای و بازفعال‌شدن پهنه‌های برشی در زون سیستان است. اقتباس و بازترسیم‌شده از Jentzer et al. (2022).

شرق ایران است که مرز تکتونیکی میان بلوک لوت و بلوک افغان–هلمند را تشکیل می‌دهد (Tirrul et al., 1983; Jentzer et al., 2022). این زون از بقایای لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس، مجموعه‌های افیولیتی، توالی‌های فلیشی و واحدهای آتشفشانی–رسوبی تشکیل شده و یکی از مهم‌ترین پهنه‌های زمین‌درز اقیانوسی حفظ‌شده در شرق ایران به شمار می‌رود (Angiboust et al., 2013; Bonnet et al., 2018) (شکل‌های ۶ و ۷). برخلاف روند غالب کمربندهای نئوتتیسی که عمدتاً امتداد شرقی–غربی دارند، زون سیستان دارای روند عمومی شمالی–جنوبی است؛ ویژگی‌ای که بازتاب تکامل تکتونیکی ویژه این کمربند و تمرکز دگرشکلی در امتداد پهنه زمین‌درز است (Jentzer et al., 2022).

مطالعات زمین‌ساختی نشان می‌دهد که تکامل زون سیستان با گسترش یک حوضه اقیانوسی با نرخ گسترش کند در کرتاسه آغاز شده و سپس طی فرورانش لیتوسفر اقیانوسی، شکل‌گیری ماگماتیسم قوسی، دگرگونی فشاربالا–دمای پایین (HP–LT) و در نهایت فرارانش[1] مجموعه‌های افیولیتی بر روی بلوک لوت در کرتاسه پسین ادامه یافته است (Saccani et al., 2010; Angiboust et al., 2013; Bröcker et al., 2013; Jentzer et al., 2022) (شکل‌های ۶ و ۷). تداوم همگرایی و برخورد نهایی بلوک‌های لوت و افغان، علاوه بر جابه‌جایی مجموعه‌های افیولیتی و تشکیل زون‌های دگرگونی، موجب توسعه شبکه‌ای از گسل‌ها و پهنه‌های برشی ناحیه‌ای، بازفعال‌شدن مکرر ساختارها و تمرکز کرنش در امتداد محور زمین‌درز شده است.

نتایج مطالعات ژئوفیزیکی نیز ضخامت پوسته‌ای در حدود ۵۲ کیلومتر و شار گرمایی نسبتاً بالا (بیش از ۱۰۰ mW m^{-2}) را برای این زون نشان می‌دهد که بیانگر پویایی پوسته و شرایط مناسب برای تداوم دگرشکلی و گردش سیالات در مقیاس ناحیه‌ای است (Mousavi and Ebbing, 2018; Jentzer et al., 2022). در نتیجه، معماری کنونی زون سیستان حاصل برهم‌کنش فرایندهای گسترش اقیانوسی، فرورانش، فرارانش، برخورد قاره‌ای و بازفعال‌شدن ساختارها در طی تکامل چندمرحله‌ای این کمربند است.

در چنین چارچوبی، بررسی معماری ساختاری منطقه کوه‌خیری و ارتباط آن با پهنه‌های برشی منطقه‌ای می‌تواند درک بهتری از نقش دگرشکلی در تمرکز، جابه‌جایی و بازآرایی کانه‌سازی فراهم کند. ازاین‌رو، در بخش بعد، ویژگی‌های ساختاری کوه‌خیری و شواهد صحرایی کنترل ساختاری کانه‌سازی به تفصیل بررسی می‌شود.

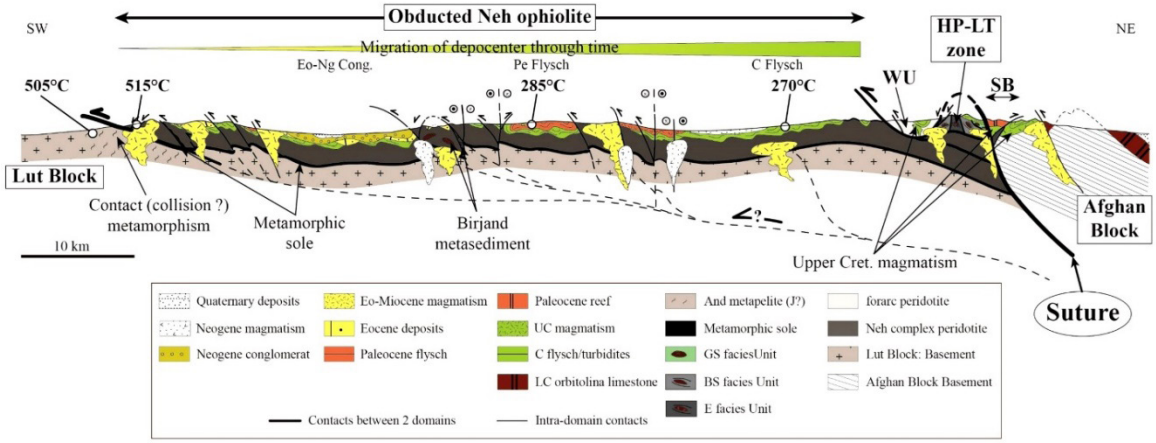
۲-۲ تحولات ساختاری منطقه کوه‌خیری

۲-۲-۱ چارچوب ساختاری کانسار

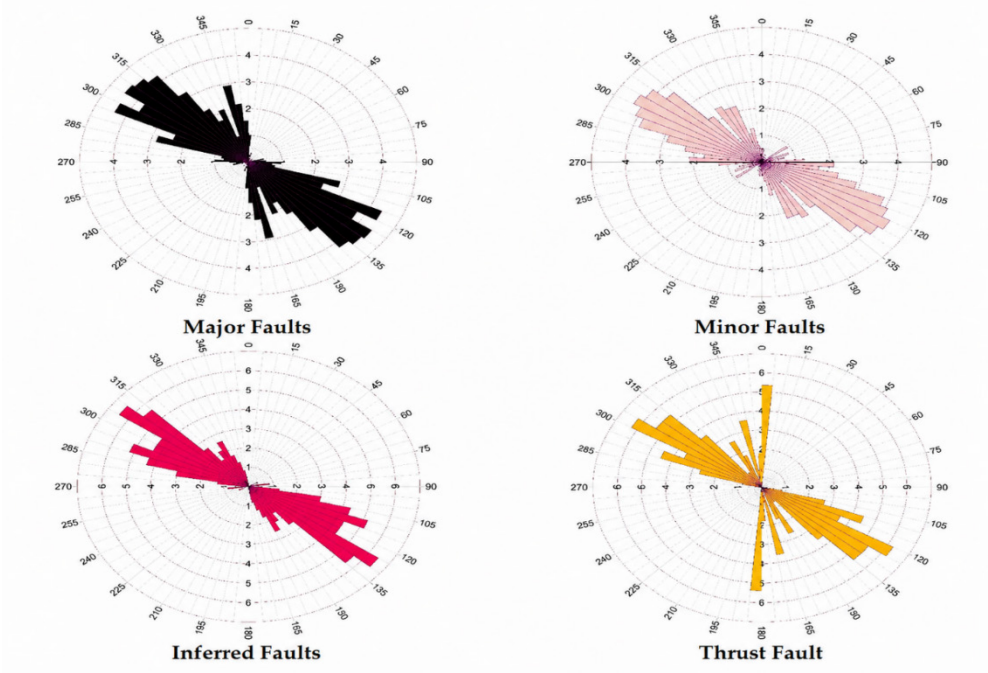
کانسار مس کوه‌خیری در حدود ۳۰ کیلومتری جنوب‌غرب سربیشه و در بخش مرکزی زون زمین‌درز سیستان، در محدوده کمپلکس افیولیتی- ولکانیکی نِه قرار گرفته است. قرارگیری این کانسار در امتداد یکی از پهنه‌های اصلی تمرکز کرنش زون سیستان، آن را در معرض یک تاریخچه دگرشکلی چندمرحله‌ای مرتبط با بسته‌شدن حوضه اقیانوسی سیستان و برخورد نهایی بلوک‌های لوت و افغان قرار داده است (Tirrul et al., 1983; Jentzer et al., 2022). سنگ‌های میزبان عمدتاً شامل بازالت، بازالت–آندزیت، واحدهای آذرآواری و برش‌های تکتونو–هیدروترمال هستند که در اثر فعالیت چندمرحله‌ای گسل‌ها و پهنه‌های برشی، به‌طور گسترده خردشده، جابه‌جا و دگریخت شده‌اند (Sac-cani et al., 2010; Zarrinkoub et al., 2012).

به‌منظور تبیین جایگاه ساختاری کانسار، داده‌های ساختاری برداشت‌شده در این پژوهش (جدول ۱) با چارچوب ساختاری ناحیه‌ای و رزدیاگرام گسل‌های منطقه سهل‌آباد ارائه‌شده توسط (Shirazi et al. 2022) مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که گسل‌های اصلی منطقه سهل‌آباد دارای روند غالب NW–SE (حدود ۱۱۵° تا ۱۳۵° با میانگین ۱۲۹٫۸°) هستند و در کنار آن‌ها، گسل‌های فرعی، گسل‌های فرضی و راندگی‌ها نیز الگوی ساختاری منطقه را تکمیل می‌کنند (شکل ۸). این مجموعه بیانگر غلبه یک سامانه برشی با روند

۱ Obduction



شکل ۷. مقطع شماتیک زمین‌ساختی-دگرگونی زون زمین‌درز سیستان (در امتداد خط A–A′ در شکل ٦ب) که معماری پوسته‌ای و تکامل برخوردی این کمربند میان بلوک لوت و بلوک افغان را نشان می‌دهد. این مدل شامل فرارانش افیولیت نِه، مجموعه دگرگونی زیرین افیولیت (metamorphic sole)، زون دگرگونی فشاربالا - دمای پایین (HP–LT)، واحدهای افیولیتی، توالی‌های فلیشی کرتاسه و پالئوژن، مهاجرت مرکز رسوب‌گذاری (depocenter migration)، ماگماتیسم کرتاسه پسین، محل زمین‌درز (Suture) و گسل‌ها و پهنه‌های برشی اصلی است. این مقطع، ارتباط میان تکامل زمین‌ساختی زون سیستان و توسعه ساختارهای عمده کنترل‌کننده دگرشکلی و گردش سیالات را در مقیاس ناحیه‌ای نشان می‌دهد. اقتباس و بازترسیم‌شده از Jentzer et al. (2022).



شکل ۸. رزدیاگرام گسل‌های منطقه سهل‌آباد (برگرفته از Shirazi et al., 2022) که توزیع روندی گسل‌های اصلی، فرعی، فرضی و راندگی‌ها را نشان می‌دهد. بیشترین فراوانی گسل‌ها در بازه ۱۱۵ تا ۱۳۵° (روند NW–SE) با میانگین حدود ۱۲۹.۸° مشاهده می‌شود که بیانگر غلبه این سامانه ساختاری در مقیاس ناحیه‌ای زون سیستان است. این چارچوب ساختاری مبنای مقایسه با داده‌های برداشت‌شده از کانسار کوه‌خیری در شکل ۹ قرار گرفته است.

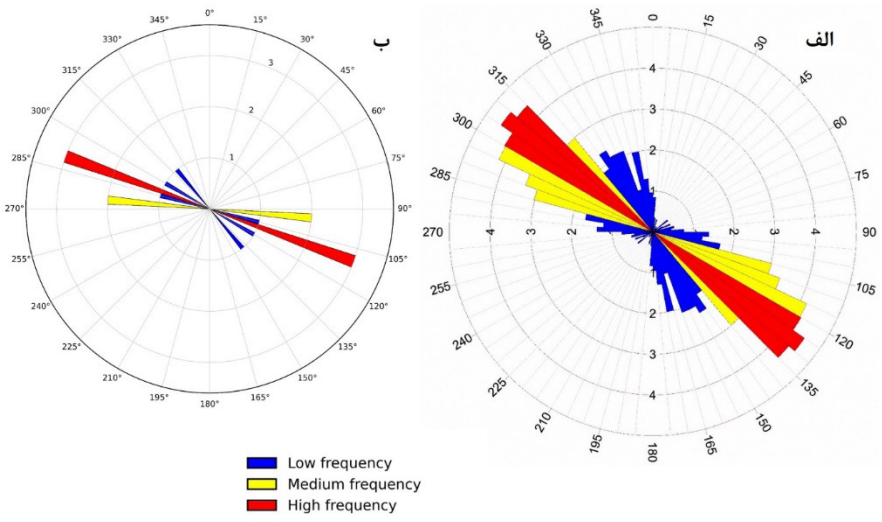
شمال‌غرب–جنوب‌شرق در مقیاس ناحیه‌ای است.

در محدوده کانسار کوه‌خیری نیز داده‌های برداشت‌شده روندی بین N40W تا N87W (معادل حدود ۹۳° تا ۱۴۰°) را نشان می‌دهد که با روند غالب گسل‌های ناحیه‌ای انطباق قابل‌توجهی دارد (شکل ۹ و جدول ۱). این همخوانی هندسی نشان می‌دهد که معماری ساختاری کانسار تحت‌تأثیر مستقیم سامانه‌های گسلی ناحیه‌ای زون سیستان شکل گرفته است. افزون بر این، امتداد زون‌های دگرسان، واحدهای آتشفشانی مافیک میزبان و بخش عمده رخدادهای کانی‌سازی نیز با همین روند غالب همسو هستند.

در کنار سامانه اصلی NW–SE، مجموعه‌ای از ساختارهای فرعی با روند NE–SW نیز در محدوده کانسار توسعه یافته‌اند. این ساختارها عمدتاً به‌صورت گسل‌های انتقالی عمل کرده و در محل تقاطع با پهنه‌های برشی اصلی، با توسعه زون‌های خردشدگی،

جدول ۱. داده‌های ساختاری منتخب از ایستگاه‌های شاخص کانسار مس کوه‌خیری، شامل اندازه‌گیری‌های نماینده از ساختارهای شکننده و عناصر چین‌خوردگی؛ مختصات و موقعیت ایستگاه‌ها بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ ارائه شده است.

موقعیت	مختصات (X)	مختصات (Y)	محل اندازه‌گیری	روند	شیب	جهت شیب
۱	۷۶۲۷۰۶	۳۵۸۲۸۷۷	مرز بین ولکانیک‌ها و شیل‌های قرمز رنگ	N70W	۴۵	NE
۲	۷۶۲۱۳۳	۳۵۸۳۱۱۰	مرز بین شیل قرمز و سبز	N70W	۷۵	SW
۳	۷۶۲۱۷۶	۳۵۸۳۱۲۸	شیل‌های اسلیتی سبز رنگ	N85W	۵۰	NE
۴	۷۶۲۱۸۶	۳۵۸۲۹۱۹	شیل‌های اسلیتی سبز رنگ مجاور ولکانیک‌ها	N60W	۲۵	SW
۵	۷۶۲۱۹۶	۳۵۸۲۹۳۴	مرز بین شیل‌های اسلیتی و ولکانیک	N40W	۷۲	NE
۶	۷۶۲۲۷۵	۳۵۸۳۰۶۱	تناوب شیل قرمز با میان لایه‌ها	N75W	۶۵	NE
۷	۷۶۲۴۵۴	۳۵۸۳۰۲۸	مرز بین شیل‌های قرمز و سبز	N70W	۶۰	NE
۸	۷۶۲۴۵۷	۳۵۸۲۸۸۲	داخل شیل‌های قرمز	N87W	۶۴	NE



شکل ۹. (الف) رزدیاگرام گسل‌های منطقه سهل‌آباد (برگرفته از Shirazi et al., 2022) و (ب) رزدیاگرام ساختارهای برداشت‌شده در کوه‌خیری. روند غالب داده‌های ساختاری کانسار بین N40W تا N87W (معادل حدود ۹۳° تا ۱۴۰°) قرار دارد و با روند غالب گسل‌های ناحیه‌ای NW–SE انطباق دارد. این همخوانی هندسی نشان می‌دهد که معماری ساختاری کانسار کوه‌خیری در چارچوب سامانه‌های برشی ناحیه‌ای زون سیستان تکامل یافته است. همچنین هم‌راستایی زون‌های دگرسان و کانه‌دار با این روند غالب، از نقش مهم این ساختارها در کنترل مسیرهای گردش سیالات و تمرکز مجدد کانه‌سازی پشتیبانی می‌کند.

افزایش شدت دگرسانی و تمرکز موضعی کانه‌سازی همراه هستند. این هم‌مکانی فضایی بیانگر آن است که ساختارهای فرعی احتمالاً با افزایش موضعی کرنش و نفوذپذیری، شرایط مناسبی را برای گردش مجدد سیالات گرمابی و بازآرایی کانه‌سازی اولیه فراهم کرده‌اند.

در مجموع، مقایسه الگوی ساختاری ناحیه‌ای با داده‌های برداشت‌شده از کانسار کوه‌خیری نشان می‌دهد که سامانه چندمرحله‌ای پهنه‌های برشی NW–SE چارچوب اصلی معماری ساختاری منطقه را تشکیل داده و یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده توزیع زون‌های دگرسان، مسیرهای گردش سیالات گرمابی و تمرکز مجدد کانه‌سازی در این کانسار محسوب می‌شود.

۲-۲-۲ شواهد دگرشکلی و کنترل ساختاری کانه‌زایی

در مقیاس کانسار، یک چین کم‌شیب تا خوابیده با روند غالب NW–SE قابل ردیابی است که خط لولای آن تقریباً با امتداد پهنه‌های برشی اصلی هم‌راستا است (شکل ۱۰). این هم‌راستایی نشان می‌دهد که چین‌خوردگی و فعالیت پهنه‌های برشی احتمالاً در یک رژیم دگرشکلی مشترک و در طی مراحل پایانی تکامل برخوردی زون سیستان توسعه یافته‌اند.

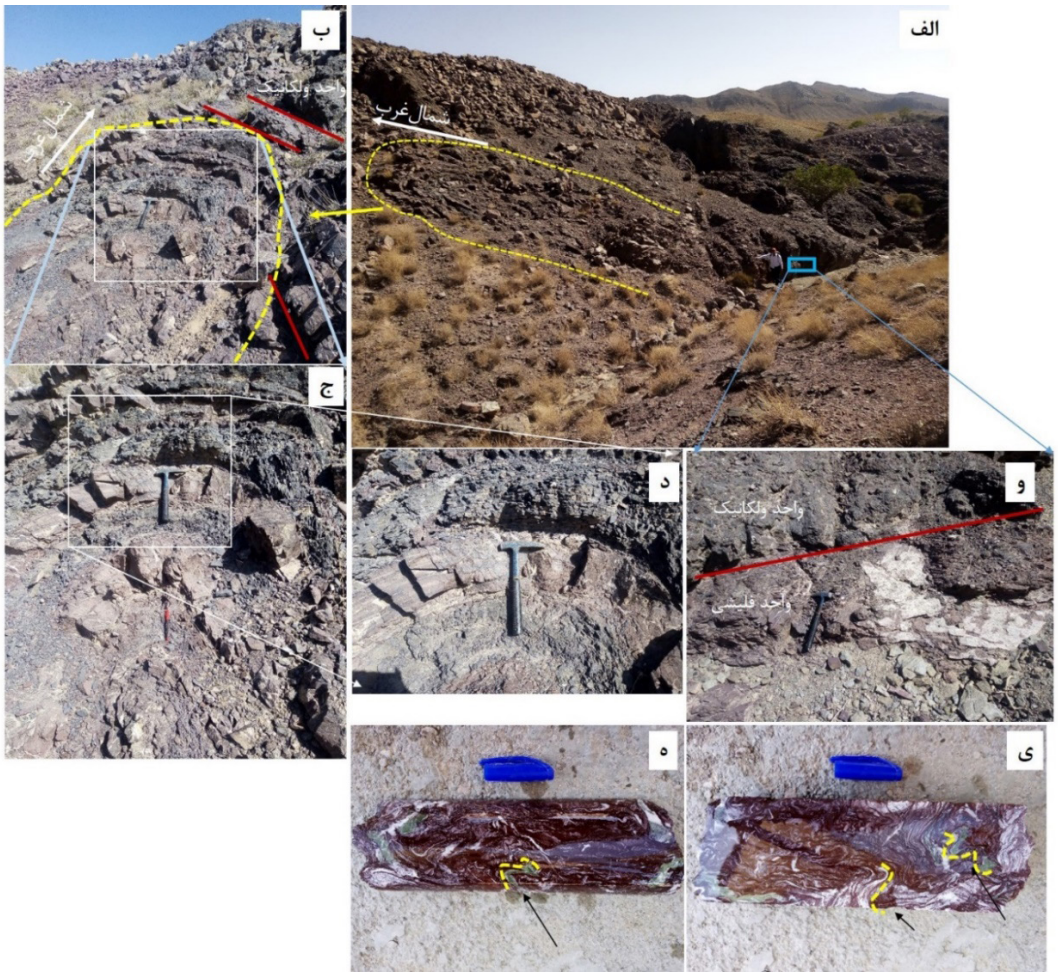
در ناحیه لولای چین، افزایش تراکم شکستگی‌ها، توسعه برش‌های تکتونیکی، خردشدگی شدید و اختلاط مکانیکی واحدهای ولکانیکی و فلیشی به‌خوبی قابل مشاهده است (شکل ۱۰ب–د). تماس این واحدها به‌جای یک مرز لیتولوژیکی ساده، به پهنه‌ای برشی تبدیل شده که با رگه‌های کلسیتی، دگرسانی کلریتی و برش‌های هیدروترمال همراه است. این ویژگی‌ها بیانگر آن است که ناحیه لولا محل تمرکز کرنش و افزایش نفوذپذیری مؤثر سنگ میزبان بوده است. در امتداد این پهنه‌ها، زون‌های خردشدگی، کاتاکلاز، برش‌های گسلی و برش‌های تکتونو–هیدروترمال همراه با سیمان کلریتی، کربناتی، سیلیسی و اکسیدهای آهن گسترش یافته‌اند. حضور این مجموعه کانی‌ها در ماتریکس برش‌ها و رگه‌های پرکننده شکستگی‌ها نشان می‌دهد که شکستگی‌ها طی چندین مرحله باز شده و بارها توسط سیالات گرمابی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در بخش‌هایی از زون‌های برشی، فابریک‌های برشی، رگه‌های کششی، پورفیروکلاست‌های چرخیده و مغزه‌های حفاری دگرشکل‌شده (شکل ۱۰ه–ی) بیانگر آن است که تغییرشکل تنها به یک مرحله محدود نبوده، بلکه بازفعال‌شدن مکرر ساختارها موجب توسعه مسیرهای جدید جریان سیالات شده است. همبستگی فضایی میان زون‌های دگرسان، تراکم شکستگی‌ها و تمرکز کانه‌زایی نیز این تفسیر را تقویت می‌کند. بیشترین تمرکز کانه‌سازی در نواحی لولای چین، محل تقاطع پهنه‌های برشی و خمیدگی گسل‌های اصلی مشاهده می‌شود؛ نواحی‌ای که با دگرسانی کلریتی–اپیدوتی، برش‌های اکسیدشده، رگه‌های کلسیتی و حضور موضعی مس طبیعی همراه هستند (شکل‌های ۱۱ و ۱۳). چنین الگویی نشان می‌دهد که تمرکز کرنش موجب افزایش نفوذپذیری، هدایت مجدد سیالات گرمابی و بازتوزیع کانه‌زایی اولیه شده است. در مقابل، با افزایش فاصله از این ساختارها، شدت خردشدگی، تراکم شکستگی‌ها، میزان دگرسانی و فراوانی کانه‌زایی به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. این تغییرات فضایی نشان می‌دهد که توزیع کانه‌زایی در کانسار کوه‌خیری عمدتاً تابع معماری ساختاری و میزان تمرکز کرنش بوده است.

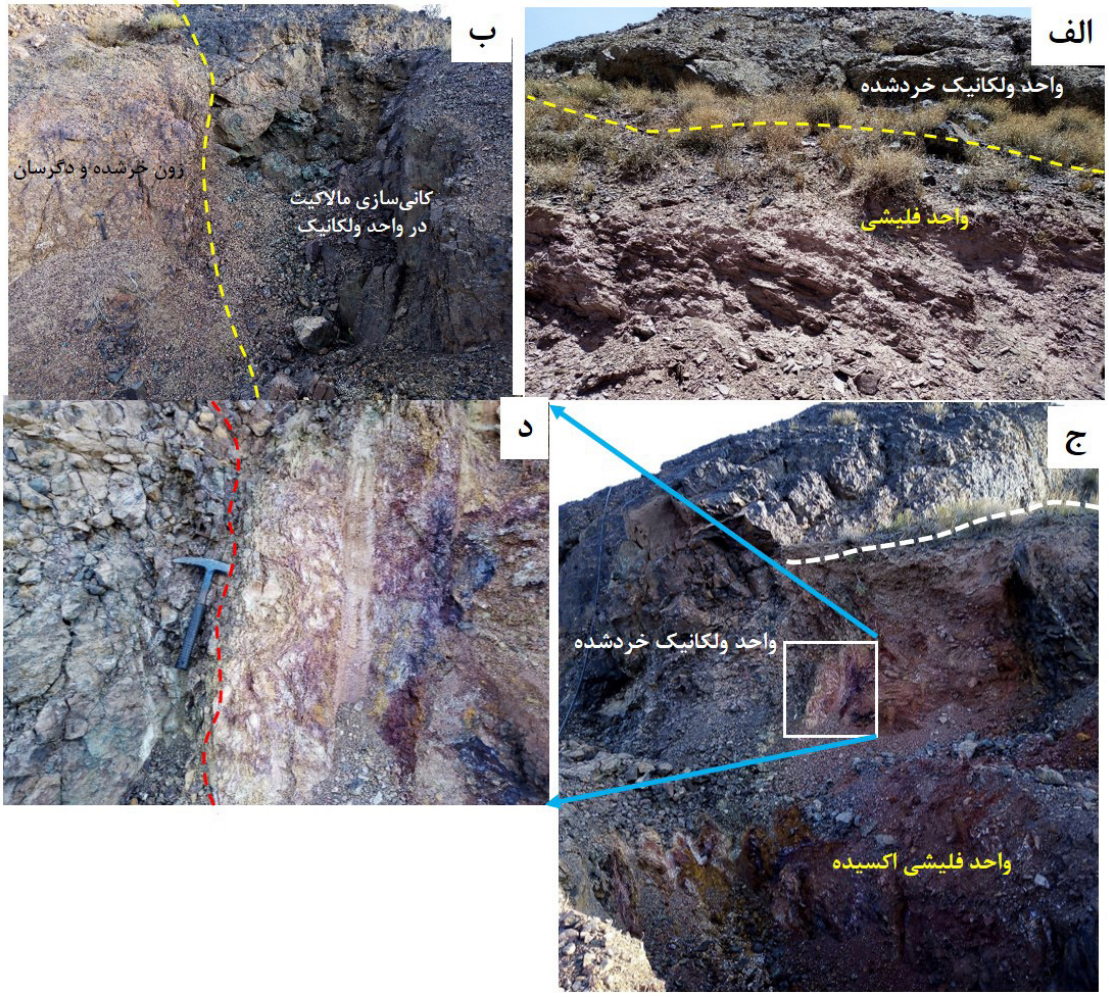
تحلیل خطواره‌های ناحیه‌ای نیز این الگو را تأیید می‌کند؛ به‌گونه‌ای که بیشترین تراکم خطواره‌ها و پهنه‌های برشی با تمرکز رخدادهای معدنی هم‌پوشانی دارد و بخش عمده‌ای از رخدادهای مس در مجاورت سامانه‌های گسلی اصلی متمرکز شده‌اند (Shi-razi et al., 2022). این روابط نشان می‌دهد که پهنه‌های برشی در کانسار کوه‌خیری صرفاً ساختارهای پساکانه‌زایی نیستند، بلکه از مراحل اولیه تشکیل سامانه گرمابی تا بازفعال‌شدگی‌های بعدی، نقش محوری در کنترل مسیرهای گردش سیالات، توسعه زون‌های تغذیه، بازآرایی کانه‌زایی و تمرکز مجدد مس ایفا کرده‌اند. در نتیجه، الگوی ساختاری کنونی کانسار بازتاب برهم‌کنش میان کانه‌زایی اولیه یک سامانه VMS نوع قبرس و دگرشکلی چندمرحله‌ای ناشی از تکامل برخوردی زون سیستان است.

۲-۲-۳ تکامل دگرشکلی کانسار

شواهد صحرایی، ساختاری، کانه‌شناسی و روابط دگرسانی نشان می‌دهد که تکامل کانسار کوه‌خیری حاصل سه مرحله اصلی بوده است: مرحله نخست، همزمان با گسترش حوضه اقیانوسی سیستان در کرتاسه روی داده و با تشکیل سنگ‌های آتشفشانی مافیک، توسعه سامانه گرمابی زیردریایی و تشکیل کانه‌زایی اولیه پیریت ± کالکوپیریت همراه با دگرسانی کلریتی–اپیدوتی در زون‌های تغذیه و استوک‌ورکی مشخص می‌شود (Franklin et al., 1981; Galley et al., 2007). مرحله دوم، با بسته‌شدن حوضه اقیانوسی و برخورد بلوک‌های لوت و افغان آغاز شده است. طی این مرحله، توسعه پهنه‌های برشی، چین‌خوردگی کم‌شیب، تمرکز کرنش و بازفعال‌شدن ساختارها موجب خردشدگی، جابه‌جایی و بازآرایی معماری



شکل ۱۰. شواهد صحرایی و مغزه‌های حفاری از تمرکز دگرشکلی و کنترل ساختاری کانه‌زایی در کانسار مس کوه‌خیری. (الف) نمای کلّی یک چین کم‌شیب تا خوابیده با روند غالب NW–SE که هندسه کلّی کانسار را کنترل می‌کند. (ب–د) بزرگنمایی ناحیه لولای چین که افزایش تراکم شکستگی‌ها، خردشدگی سنگ، تشکیل برش‌های تکتونیکی و تمرکز کرنش را نشان می‌دهد؛ این ناحیه بیشترین شدت دگرشکلی را در کانسار ثبت کرده است. (و) تماس تکتونیزه میان واحد ولکانیکی مافیک و توالی فلیشی، همراه با رگه‌های کلسیتی و شواهد افزایش نفوذپذیری در امتداد پهنه برشی. (ه–ی) مغزه‌های حفاری از پهنه‌های برشی که فابریک‌های برشی، چین‌خوردگی موضعی، رگه‌های چندنسلی کلسیتی، دگرسانی کلریتی و آثار بازفعال‌شدگی چندمرحله‌ای ساختارها را نشان می‌دهند. مجموعه این شواهد بیانگر آن است که هسته چین و پهنه‌های برشی هم‌راستا با آن، مهم‌ترین نواحی تمرکز کرنش بوده و با افزایش نفوذپذیری مؤثر، مسیرهای اصلی گردش سیالات گرمابی، بازآرایی کانه‌زایی اولیه و تمرکز مجدد مس را در سامانه VMS تیپ قبرس کوه‌خیری کنترل کرده‌اند.



شکل ۱۱. شواهد صحرایی از نقش تماس‌های تکتونیزه و پهنه‌های برشی در کنترل دگرسانی و کانه‌زایی در کانسار مس کوه‌خیری. (الف) تماس تکتونیزه میان واحد ولکانیکی مافیک به‌شدت خردشده و توالی فلیشی که بیانگر تمرکز دگرشکلی در امتداد یک پهنه برشی است. (ب) تمرکز کانه‌سازی مالاکیت در واحد ولکانیکی مجاور این تماس که وابستگی فضایی کانه‌زایی به زون برشی را نشان می‌دهد. (ج) توسعه زون اکسیدان و دگرسانی در امتداد مرز ولکانیک-فلیش که با افزایش خردشدگی و نفوذپذیری ساختاری همراه است. (د) بزرگنمایی ناحیه تماس که برش تکتونیکی، خردشدگی شدید، اکسیداسیون و دگرسانی متمرکز را در امتداد پهنه برشی نشان می‌دهد. این مجموعه شواهد بیانگر آن است که تماس‌های تکتونیزه و پهنه‌های برشی، با ایجاد نفوذپذیری ثانویه، مسیرهای اصلی گردش سیالات گرمابی و اکسیدکننده را فراهم کرده و در بازآرایی و تمرکز مجدد کانه‌زایی مس نقش اساسی ایفا کرده‌اند.

اولیه سامانه VMS شده است. افزایش نفوذپذیری ناشی از این فرآیندها، امکان گردش مجدد سیالات و تمرکز دوباره کانه‌زایی را در هسته چین و محل تقاطع پهنه‌های برشی فراهم کرده است. مرحله سوم به بازفعال‌شدن ساختارها در شرایط پسابرخوردی مربوط می‌شود. در این مرحله، توسعه شکستگی‌های ثانویه و افزایش نفوذپذیری، مسیر ورود سیالات متئوریکی را فراهم کرده و غنی‌شدگی سوپرژن، تشکیل مس طبیعی و توسعه زون اکسیدان را در امتداد همان ساختارهای پیشین کنترل کرده است (Jentzer et al., 2017; Rojhani et al., 2026). در مجموع، شواهد ارائه‌شده نشان می‌دهد که معماری کنونی کانسار کوه‌خیری حاصل برهم‌کنش میان کانه‌زایی اولیه یک سامانه VMS تیپ قبرس و دگرشکلی چندمرحله‌ای مرتبط با تکامل برخوردی زون سیستان است. پهنه‌های برشی و نواحی تمرکز کرنش نه‌تنها جایگیری اولیه سامانه گرمابی را کنترل کرده‌اند، بلکه در مراحل بعدی با بازفعال‌شدن مکرر، نقش اصلی را در بازآرایی، تمرکز مجدد و غنی‌شدگی کانه‌زایی ایفا کرده‌اند.

۳. بحث

۳-۱ تکامل ساختاری و بازآرایی تکتونیکی سامانه VMS تیپ قبرس کوه‌خیری

تلفیق شواهد زمین‌شناسی، ساختاری، کانه‌شناسی و داده‌های حفاری نشان می‌دهد که کانسار کوه‌خیری را نمی‌توان صرفاً به‌عنوان یک نهشته VMS حفظ‌شده تفسیر کرد، بلکه این کانسار نمایانگر یک سامانه ماسیوسولفید ولکانوژنیک تیپ قبرس است که هندسه اولیه آن در اثر دگرشکلی چندمرحله‌ای مرتبط با تکامل برخوردی زون زمین‌درز سیستان به‌طور گسترده بازآرایی شده است. اگرچه حضور کانی‌سازی استوک‌ورکی و رگچه‌ای، همراهی پیریت ± کالکوپیریت با دگرسانی کلریتی–اپیدوتی–کربناته، نتایج آنالیز ژئوشیمی، سنگ‌های میزبان آتشفشانی مافیک، و توسعه برش‌های تکتونو–هیدروترمال، ویژگی‌های کلاسیک زون تغذیه سامانه‌های VMS نوع قبرس را نشان می‌دهد (Franklin et al., 2005; Galley et al., 2007; Hannington et al., 2011)، اما معماری کنونی کانسار عمدتاً محصول دگریختی پس از کانه‌زایی است و نه بازتاب مستقیم هندسه اولیه کانسار. شواهد صحرایی ارائه‌شده در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲، شامل توسعه پهنه‌های برشی، برش‌های تکتونو–هیدروترمال، خردشدگی شدید واحدهای ولکانیکی، جابه‌جایی بلوکی و تمرکز کرنش در ناحیه لولای چین، نشان می‌دهد که طی بسته‌شدن حوضه سیستان و برخورد بلوک‌های لوت و افغان، سامانه اولیه VMS تحت تأثیر یک رژیم دگرشکلی پیشرونده قرار گرفته است. در این فرایند، ساختارهای اولیه زون تغذیه نه تنها تغییرشکل یافته‌اند، بلکه در اثر بازفعال‌شدن مکرر، به مسیرهای جدید برای گردش سیالات تبدیل شده‌اند. بنابراین، هندسه کنونی کانسار حاصل برهم‌کنش میان کانه‌زایی اولیه و دگریختی برخوردی بعدی است، نه صرفاً نتیجه تشکیل اولیه سامانه گرمابی. هم‌راستایی محور چین کم‌شیب با روند غالب پهنه‌های برشی NW–SE و انطباق آن با روند ساختارهای ناحیه‌ای زون سیستان، بیانگر آن است که تمرکز کرنش در طی مراحل پایانی تکامل برخوردی، معماری کانسار



شکل ۱۲. شواهد صحرایی و زیرسطحی از نقش دگرشکلی شکننده در بازآرایی ساختاری سامانه VMS تیپ قبرس کانسار کوه‌خیری. (الف) توسعه یک پهنه خردشدگی (damage zone) در واحد ولکانیکی مافیک که تمرکز کرنش و تخریب مکانیکی سنگ میزبان را در امتداد پهنه‌های برشی نشان می‌دهد. (ب- ج) برش‌های تکتونو–هیدروترمال متشکل از قطعات دگرسان‌شده سنگ‌های ولکانیکی در ماتریکس کلریتی- اکسیدی همراه با رگه‌های چندنسلی کلسیتی و شکستگی‌های متقاطع که بیانگر بازفعال‌شدن مکرر ساختارها، تکامل نفوذپذیری ساختاری و گردش چندمرحله‌ای سیالات هستند. (د) مغزه حفاری از زون تماس ولکانیک–فلیش که اختلاط تکتونیکی واحدهای سنگی، تشکیل برش ماتریکس‌دار و رگه‌های کلسیتی را نشان می‌دهد؛ این بافت‌ها بیانگر آن هستند که پهنه‌های برشی نه‌تنها موجب تغییرشکل مکانیکی سامانه شده‌اند، بلکه مسیرهای اصلی هدایت سیالات و بازآرایی کانه‌زایی را نیز کنترل کرده‌اند.

را به‌طور اساسی کنترل کرده است. تمرکز زون‌های کانه‌دار در هسته چین، در محل خمیدگی گسل‌ها و در تقاطع پهنه‌های برشی نیز نشان می‌دهد که این ساختارها علاوه بر تغییر شکل مکانیکی کانسار، محل تمرکز مجدد نفوذپذیری و گردش سیالات بوده‌اند. چنین الگویی با سامانه‌های VMS دگرشکل‌یافته در افیولیت‌های عمان و ترودوس قابل مقایسه است؛ جایی که دگرشکلی پس از کانه‌زایی موجب قطعه‌قطعه‌شدن، بازآرایی هندسی و تغییر مسیر زون‌های تغذیه اولیه شده است (Galley & Koski, 2012; Gilgen et al., 2016).

در نتیجه، مهم‌ترین پیام زمین‌ساختی این مطالعه آن است که تکامل کانسار کوه‌خیری را باید در چارچوب یک سامانه VMS بازآرایی‌شده در یک کمربند برخوردی تفسیر کرد؛ سامانه‌ای که در آن ساختارهای شکننده و پهنه‌های برشی، نه تنها محصول برخورد بوده‌اند، بلکه عامل اصلی در حفظ، تغییرشکل و سازمان‌دهی مجدد کانه‌زایی اولیه محسوب می‌شوند.

۳-۲ کنترل‌های ساختاری بر تکامل نفوذپذیری، گردش سیالات و بازتمرکز کانه‌زایی

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پهنه‌های برشی با روند غالب NW–SE فقط، عناصر هندسی کنترل‌کننده کانسار نیستند، بلکه مهم‌ترین عامل در تکامل نفوذپذیری ساختاری سامانه محسوب می‌شوند. توسعه پیشرونده این ساختارها طی تکامل برخوردی زون سیستان، موجب ایجاد زون‌های خردشدگی، افزایش تراکم شکستگی‌ها و شکل‌گیری گسترده زون‌های تخریب[1] شده است که مسیرهای ترجیحی برای گردش چندمرحله‌ای سیالات را فراهم کرده‌اند. حضور برش‌های تکتونو–هیدروترمال، رگه‌های چندنسلی کلسیتی، سیمان‌های کلریتی و اکسیدهای آهن در امتداد این ساختارها، بیانگر آن است که پهنه‌های برشی در مراحل مختلف تکامل کانسار بارها بازفعال شده و به‌عنوان مجراهای مؤثر انتقال سیالات عمل کرده‌اند. تمرکز کانی‌سازی در محل تقاطع پهنه‌های برشی، خمیدگی گسل‌ها و ناحیه لولای چین کم‌شیب نشان می‌دهد که افزایش موضعی کرنش موجب افزایش نفوذپذیری مؤثر سنگ میزبان شده است؛ الگویی که با مدل‌های ساختاری سامانه‌های VMS در کمربندهای برخوردی همخوانی دارد (Sillitoe, 2005; Galley et al., 2007). این نواحی از دیدگاه مکانیک سنگ، محل توسعه شکستگی‌های ثانویه و بازشدگی مجدد شکستگی‌های قدیمی بوده و در نتیجه بیشترین ظرفیت را برای عبور و تمرکز سیالات گرمابی داشته‌اند. هم‌زمانی فضایی میان زون‌های دگرسان، استوک‌ورک‌های سولفیدی، برش‌های تکتونو–هیدروترمال و هسته چین، نشان می‌دهد که بازآرایی کانه‌زایی اولیه مستقیماً تابع تکامل معماری ساختاری بوده است، نه صرفاً حاصل فرآیندهای گرمابی اولیه. بازفعال‌شدن مکرر این ساختارها در مراحل پس‌برخوردی، علاوه بر جابه‌جایی مکانیکی توده‌های سولفیدی، شرایط لازم برای بازگردش سیالات و تحرک ثانویه فلزات را نیز فراهم کرده است. جانشینی موضعی کالکوپیریت توسط کالکوسیت، حضور کوولیت و مس طبیعی در امتداد شکستگی‌ها (شکل‌های ۴ و ۱۳) و توسعه زون اکسیدان، بیانگر آن است که ساختارهای شکننده در مرحله سوپرژن نیز همچنان نقش کنترل‌کننده خود را حفظ کرده‌اند. بنابراین، ساختارها تنها در جایگیری اولیه کانه‌زایی مؤثر نبوده‌اند، بلکه در مراحل بعدی انحلال، انتقال و بازتمرکز ثانویه مس نیز نقش تعیین‌کننده داشته‌اند. هم‌پوشانی فضایی رخدادهای معدنی با تراکم خطواره‌ها و سامانه‌های گسلی ناحیه‌ای نیز این تفسیر را تقویت می‌کند. انطباق روند غالب ساختارهای برداشت‌شده در کوه‌خیری با سامانه‌های برشی منطقه سهل‌آباد نشان می‌دهد که تکامل کانسار تحت کنترل مستقیم معماری ساختاری زون سیستان بوده است. از این‌رو، بازآرایی کانه‌زایی در کوه‌خیری را می‌توان پیامد مستقیم برهم‌کنش میان دگرشکلی پیشرونده، بازفعال‌شدن ساختارهای شکننده و تکامل نفوذپذیری ساختاری دانست.

۳-۳ دلالت‌های زمین‌ساختی، مدل ژنتیکی و اهمیت اکتشافی

---

۱ damage zone



شکل ۱۳. شواهد مغزه حفاری از نقش بازفعال‌شدن ساختارهای شکننده در غنی‌شدگی سوپرژن مس در کانسار کوه‌خیری. (الف) توالی فلیشی قرمز و سبز همراه با یک زون برشی دگرسان‌شده و یک واحد برشی‌شده حاوی کانه‌سازی که در مجاورت آن قرار گرفته است. (ب) بزرگنمایی زون تماس که تمرکز خردشدگی، دگرسانی و کانه‌سازی را در امتداد ساختار شکننده نشان می‌دهد. (ج) تشکیل مس طبیعی به‌صورت رگچه‌ها و تجمع‌های موضعی بر روی سطوح شکستگی واحد برشی‌شده. این روابط بافتی نشان می‌دهد که بازفعال‌شدن پهنه‌های برشی پس از کانه‌زایی اولیه، مسیرهای ترجیحی برای گردش سیالات اکسیدکننده ایجاد کرده و از طریق افزایش نفوذپذیری ساختاری، موجب انحلال، انتقال و بازتمرکز ثانویه مس در مرحله سوپرژن شده است.

بر اساس نتایج این پژوهش، تکامل کانسار کوه‌خیری را می‌توان در قالب یک مدل سه‌مرحله‌ای تفسیر کرد. در مرحله نخست، طی گسترش حوضه اقیانوسی سیستان در کرتاسه، فعالیت آتشفشانی زیردریایی مافیک موجب تشکیل سامانه VMS تیپ قبرس، توسعه زون‌های تغذیه استوک‌ورکی و دگرسانی کلریتی–اپیدوتی شده است. در مرحله دوم، همزمان با بسته‌شدن حوضه اقیانوسی و برخورد بلوک‌های لوت و افغان، توسعه چین‌ها، پهنه‌های برشی و سامانه‌های گسلی موجب خردشدگی، قطعه‌قطعه‌شدن و بازآرایی هندسی سامانه اولیه گردیده است. در مرحله سوم، بازفعال‌شدن این ساختارها در شرایط پس‌برخوردی، نفوذپذیری ساختاری را افزایش داده و امکان گردش سیالات متئوریکی، غنی‌شدگی سوپرژن و تشکیل زون اکسیدان را فراهم ساخته است. این مدل، ضمن سازگاری با الگوی تکامل سامانه‌های VMS نوع قبرس در کمربندهای افیولیتی دگرشکل‌یافته، نشان می‌دهد که در زون زمین‌درز سیستان نقش دگرشکلی پس از کانه‌زایی بسیار پررنگ‌تر از آن چیزی است که تاکنون برای بسیاری از رخدادهای مشابه گزارش شده است. از این دیدگاه، ساختارهای شکننده تنها عناصر جابه‌جاکننده کانه‌زایی نیستند، بلکه بخشی از فرایند ژنتیکی تکامل کانسار محسوب می‌شوند و از طریق کنترل نفوذپذیری، هدایت سیالات و بازتمرکز فلزات،

در شکل‌گیری معماری نهایی سامانه نقش اساسی ایفا کرده‌اند (Galley et al., 2007; Hannington et al., 2011).

از دیدگاه اکتشافی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که هم‌زمانی سنگ‌های آتشفشانی مافیک، دگرسانی کلریتی–اپیدوتی–کربناته، زون‌های استوک‌ورکی، برش‌های تکتونو–هیدروترمال و پهنه‌های برشی با روند غالب NW–SE، مجموعه‌ای از شاخص‌های قابل اعتماد برای شناسایی سامانه‌های VMS تیپ قبرس بازآرایی‌شده در زون سیستان به شمار می‌روند. همچنین، تمرکز کانه‌زایی در هسته چین‌ها، محل تقاطع گسل‌ها و نواحی بازفعال‌شده ساختاری نشان می‌دهد که این بخش‌ها می‌توانند اهداف اولویت‌دار اکتشاف در سایر بخش‌های افیولیتی زون سیستان و کمربندهای برخوردی مشابه باشند.

٤. نتیجه‌گیری:

تایج این پژوهش نشان می‌دهد که کانسار مس کوه‌خیری در بخش مرکزی زون زمین‌درز سیستان، بازمانده یک سامانه ماسیوسولفید ولکانوژنیک (VMS) تیپ قبرس است که معماری اولیه آن در اثر دگرشکلی چندمرحله‌ای ناشی از تکامل برخوردی زون سیستان به‌طور گسترده بازآرایی شده است. حضور کانی‌سازی پیریت ± کالکوپیریت همراه با دگرسانی کلریتی–اپیدوتی–کربناته در سنگ‌های آتشفشانی مافیک، غلبه بافت‌های استوک‌ورکی و رگچه‌ای و نبود لنزهای سولفیدی توده‌ای نشان می‌دهد که بخش تغذیه سامانه حفظ شده، اما هندسه اولیه آن تحت تأثیر فرآیندهای دگریختی پس از کانه‌زایی قرار گرفته است. شواهد صحرایی، داده‌های ساختاری، مطالعات کانه‌نگاری و اطلاعات حفاری نشان می‌دهد که پهنه‌های برشی و گسل‌های با روند غالب NW–SE مهم‌ترین عناصر کنترل‌کننده تکامل کانسار بوده‌اند. این ساختارها از طریق تمرکز کرنش، افزایش نفوذپذیری ساختاری و بازفعال‌شدن مکرر، مسیرهای اصلی گردش سیالات گرمابی و سپس سیالات اکسیدکننده را فراهم کرده و در بازآرایی هندسی کانه‌زایی اولیه، توسعه برش‌های تکتونو–هیدروترمال، غنی‌شدگی سوپرژن و تشکیل مس طبیعی نقش اساسی ایفا کرده‌اند. ازاین‌رو، معماری کنونی کانسار را باید حاصل برهم‌کنش میان کانه‌زایی اولیه و تکامل ساختاری پس از آن دانست. بر پایه شواهد ارائه‌شده، تکامل کانسار کوه‌خیری در قالب یک مدل سه‌مرحله‌ای تفسیر می‌شود: (۱) تشکیل سامانه VMS تیپ قبرس در یک محیط آتشفشانی زیردریایی طی کرتاسه؛ (۲) بازآرایی ساختاری هم‌زمان با بسته‌شدن حوضه سیستان، توسعه پهنه‌های برشی و چین‌خوردگی و تمرکز مجدد کانه‌زایی؛ و (۳) بازفعال‌شدن ساختارهای شکننده در مرحله پس‌برخوردی که با افزایش نفوذپذیری، گردش سیالات متئوریکی، غنی‌شدگی سوپرژن و تشکیل زون اکسیدان همراه بوده است.

دستاورد این پژوهش می‌تواند این موضوع باشد که نشان می‌دهد در زون زمین‌درز سیستان، پهنه‌های برشی تنها موجب جابه‌جایی مکانیکی کانه‌زایی نشده‌اند، بلکه با کنترل تکامل نفوذپذیری ساختاری، هدایت چندمرحله‌ای سیالات و بازتمرکز فلزات، به بخشی از فرآیند ژنتیکی تکامل سامانه VMS تبدیل شده‌اند. این نتیجه، نقش دگرشکلی پس از کانه‌زایی را در تکامل سامانه‌های VMS تیپ قبرس در کمربندهای برخوردی برجسته می‌کند و چارچوبی برای تفسیر سایر نهشته‌های دگرشکل‌یافته افیولیتی ارائه می‌دهد.

از دیدگاه اکتشافی، هم‌زمانی سنگ‌های آتشفشانی مافیک، دگرسانی کلریتی–اپیدوتی–کربناته، زون‌های استوک‌ورکی، برش‌های تکتونو–هیدروترمال و پهنه‌های برشی با روند غالب NW–SE می‌تواند به‌عنوان مجموعه‌ای از شاخص‌های قابل اعتماد برای شناسایی سامانه‌های VMS تیپ قبرس بازآرایی‌شده در زون سیستان و سایر کمربندهای افیولیتی- برخوردی مورد استفاده قرار گیرد.

قدردانی

نویسندگان از شرکت زمین‌کاوان زمان به‌دلیل در اختیار قرار دادن بخشی از داده‌های زمین‌شناسی، حفاری، ژئوشیمیایی و فنی مورد استفاده در این پژوهش قدردانی می‌کنند. همچنین، از جناب آقای دکتر حسین قنواتی، مدیرعامل محترم شرکت زمین‌کاوان زمان، به‌دلیل

حمایت از انجام این پژوهش و صدور مجوز استفاده از داده‌های منتخب محدوده مس کوه‌خیری، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

References:

Angiboust, S., Agard, P., De Hoog, J. C. M., Omrani, J., & Plunder, A. (2013). Insights on deep, accretionary subduction processes from the Sistan ophiolitic "mélange" (Eastern Iran). Lithos, 156–159, 139–158. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.11.007

Babazadeh, S. A., & De Wever, P. (2004). Early Cretaceous radiolarian assemblages from radiolarites in the Sistan Suture (eastern Iran). Geodiversitas, 26(2), 185–206.

Bonnet, G., Agard, P., Angiboust, S., Monié, P., Jentzer, M., Omrani, J., Whitechurch, H., & Fournier, M. (2018). Tectonic slicing and mixing processes along the subduction interface: The Sistan example (Eastern Iran). Lithos, 310–311, 269–287. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.04.016

Bröcker, M., Fotoohi Rad, G., Burgess, R., Theunissen, S., Paderin, I., Rodionov, N., & Salimi, Z. (2013). New age constraints for the geodynamic evolution of the Sistan Suture Zone, eastern Iran. Lithos, 170–171, 17–34. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.02.012

Fotoohi Rad, G. R., Droop, G. T. R., Amini, S., & Moazzen, M. (2005). Eclogites and blueschists of the Sistan Suture Zone, eastern Iran: A comparison of P–T histories from a subduction mélange. Lithos, 84(1–2), 1–24. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.01.007

Franklin, J. M., Gibson, H. L., Jonasson, I. R., & Galley, A. G. (2005). Volcanogenic massive sulfide deposits. In J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb, & J. P. Richards (Eds.), Economic Geology 100th Anniversary Volume (pp. 523–560). Society of Economic Geologists. https://doi.org/10.5382/AV100.17

Franklin, J. M., Lydon, J. W., & Sangster, D. F. (1981). Volcanic-associated massive sulfide deposits. In B. J. Skinner (Ed.), Economic Geology 75th Anniversary Volume (pp. 485–627). Economic Geology Publishing Company. https://doi.org/10.5382/AV75.15

Galley, A. G., & Koski, R. A. (1999). Setting and characteristics of ophiolite-hosted volcanogenic massive sulfide deposits. In C. T. Barrie & M. D. Hannington (Eds.), Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits: Processes and Examples in Modern and Ancient Settings. Reviews in Economic Geology, 8. Society of Economic Geologists.

Galley, A. G., Hannington, M. D., & Jonasson, I. R. (2007). Volcanogenic massive sulphide deposits. In W. D. Goodfellow (Ed.), Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the

Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods (pp. 141–161). Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5.

Large, R. R., Gemmell, J. B., Paulick, H., & Huston, D. L. (2001). The Alteration Box Plot: A simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and lithogeochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits. Economic Geology, 96(5), 957–971. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.5.957

McCall, G. J. H. (1977). The geology of the Sistan region. In Proceedings of the International Symposium on Geodynamics in South-West Asia.

Moores, E. M., & Vine, F. J. (1971). The Troodos Massif, Cyprus and other ophiolites as oceanic crust: Evaluation and implications. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 268(1192), 443–467. https://doi.org/10.1098/rsta.1971.0006

Mousavi, N., & Ebbing, J. (2018). Basement characterization and crustal structure beneath the Arabia–Eurasia collision (Iran): A combined gravity and magnetic study. Tectonophysics, 731–732, 155–171. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.03.018

Navai, I. (1974). Geological map of Sahlabad, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, Tehran.

Gilgen, S. A., Diamond, L. W., Mercolli, I., Al-Tobi, K., Maidment, D. W., Close, R., & Al-Towaya, A. (2014). Volcanostratigraphic controls on the occurrence of massive sulfide deposits in the Semail Ophiolite, Oman. Economic Geology, 109(6), 1585–1610. https://doi.org/10.2113/econgeo.109.6.1585

Hannington, M., Jamieson, J., Monecke, T., Petersen, S., & Beaulieu, S. (2011). The abundance of seafloor massive sulfide deposits. Geology, 39(12), 1155–1158. https://doi.org/10.1130/G32468.1

Jentzer, M., Fournier, M., Agard, P., Omrani, J., Khatib, M. M., & Whitechurch, H. (2017). Neogene to Present paleostress field in Eastern Iran (Sistan belt) and implications for regional geodynamics. Tectonics, 36(2), 321–339. https://doi.org/10.1002/2016TC004275

Jentzer, M., Agard, P., Bonnet, G., Monié, P., Fournier, M., Whitechurch, H., Omrani, J., Zarrinkoub, M. H., Khatib, M. M., Kohansal, R., Do Couto, D., Godbillot, C., & Ninkabou, D. (2022). The North Sistan orogen (Eastern Iran): Tectono-metamorphic evolution and significance within the Tethyan realm. Gondwana Research, 109, 460–492. https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.04.004

map analysis and multifractal technique for massive sulfide copper exploration: The Sahlabad Area, East Iran. Minerals, 12(5), 549. https://doi.org/10.3390/min12050549

Sillitoe, R. H. (2005). Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits. In J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb, & J. P. Richards (Eds.), Economic Geology 100th Anniversary Volume (pp. 723–768). Society of Economic Geologists. https://doi.org/10.5382/AV100.22

Stampfli, G. M., Borel, G. D., Cavazza, W., Mosar, J., & Ziegler, P. A. (2001). Palaeotectonic and palaeogeographic evolution of the western Tethys and PeriTethyan domain (IGCP Project 369). Episodes, 24(4), 222–228. https://doi.org/10.18814/epiiugs/2001/v24i4/001

Stöcklin, J. (1974). Possible ancient continental margins in Iran. In C. A. Burk & C. L. Drake (Eds.), The Geology of Continental Margins (pp. 873–887). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-01141-6_64

Tirrul, R., Bell, I. R., Griffis, R. J., & Camp, V. E. (1983). The Sistan Suture Zone of eastern Iran. Geological Society of America Bulletin, 94(1), 134–150. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<134:TSSZOE>2.0.CO;2

Tornos, F., Peter, J. M., Allen, R., & Conde, Piercey, S. J. (2010). An overview of petrochemistry in the regional exploration for volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 10(2), 119–136. https://doi.org/10.1144/1467-7873/09-221

Rojhani, E., Ghaemi, F., Bagheri, S., Li, S., Lom, N., & van Hinsbergen, D. J. J. (2026). Geology of the abrupt northern termination of the Sistan suture zone and the subduction zone configuration in eastern Iran since the late Cretaceous. Journal of Asian Earth Sciences, 308, 107148. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2026.107148

Saccani, E., Delavari, M., Beccaluva, L., & Amini, S. (2010). Petrological and geochemical constraints on the origin of the Nehbandan ophiolitic complex (eastern Iran): Implication for the evolution of the Sistan Ocean. Lithos, 117(1–4), 209–228. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.02.016

Shanks, W. C. Pat, III, Koski, R. A., Mosier, D. L., Schulz, K. J., Morgan, L. A., Slack, J. F., Ridley, W. I., Dusel-Bacon, C., Seal, R. R., II, & Piatak, N. M. (2012). Volcanogenic massive sulfide occurrence model. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–C. https://doi.org/10.3133/sir20105070C

Shirazi, A., Hezarkhani, A., & Beiranvand Pour, A. (2022). Fusion of Lineament Factor (LF)

C. (2015). Controls on the siting and style of volcanogenic massive sulphide deposits. Ore Geology Reviews, 68, 142–163. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.003

Zarrinkoub, M. H., Pang, K.-N., Chung, S.-L., Khatib, M. M., Mohammadi, S. S., Chiu, H.-Y., & Lee, H.-Y. (2012). Zircon U–Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran. Lithos, 154, 392–405. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.007