



مقاله پژوهشی

تحلیل ساختاری معدن سرب و روی تکیه در کمربند فلززایی ملایر - اصفهان، باختر ایران

رضا علی‌پور^{۱*}، سیده زهرا حاجیلو^۱ و احمد حسینخانی^۲

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ایران

(۲) شرکت معادن سرمک، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۸

چکیده

معدن سرب و روی تکیه در بخش شمال‌باختری کمربند فلززایی ملایر - اصفهان و در پهنه سندانج - سیرجان قرار گرفته است. در این پژوهش، کانه‌زایی و ویژگی‌های ساختاری این معدن و به ویژه گسل‌های کنترل‌کننده کانه‌زایی با بهره‌گیری از تصاویر هوایی ارتوفوتو، برداشت‌های صحرایی و انجام آنالیزهای شیمیایی مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی، کانه‌زایی در معدن سرب و روی تکیه به دو شکل سولفیدی درون‌زاد و کربناتی برون‌زاد است. در منطقه مورد بررسی دو سیستم گسلی اصلی با روندهای شمال‌باختری - جنوب‌خاوری و شمال‌خاوری - جنوب‌باختری در محدوده معدن باعث دگرریختی شده و کانسنگ سولفیدی اغلب در راستای این گسل‌ها تشکیل شده است. این گسل‌ها که ابتدا در یک محیط کششی در زمان کرتاسه آغازین تشکیل شده‌اند، در مراحل پیشرفته دگرریختی ناحیه‌ای و ناشی از عملکرد زمین ساخت وارون در کرتاسه پایانی به گسل‌های معکوس پر شیب تبدیل شده‌اند. شواهد زمین ساخت وارون در منطقه مورد بررسی به صورت تشکیل گسل‌های راندگی میان‌بر با شیب کم و گسل‌های چین خورده است.

واژه‌های کلیدی: زمین ساخت وارون، کانه‌زایی، راندگی میان‌بر، سندانج - سیرجان، معدن تکیه

مقدمه

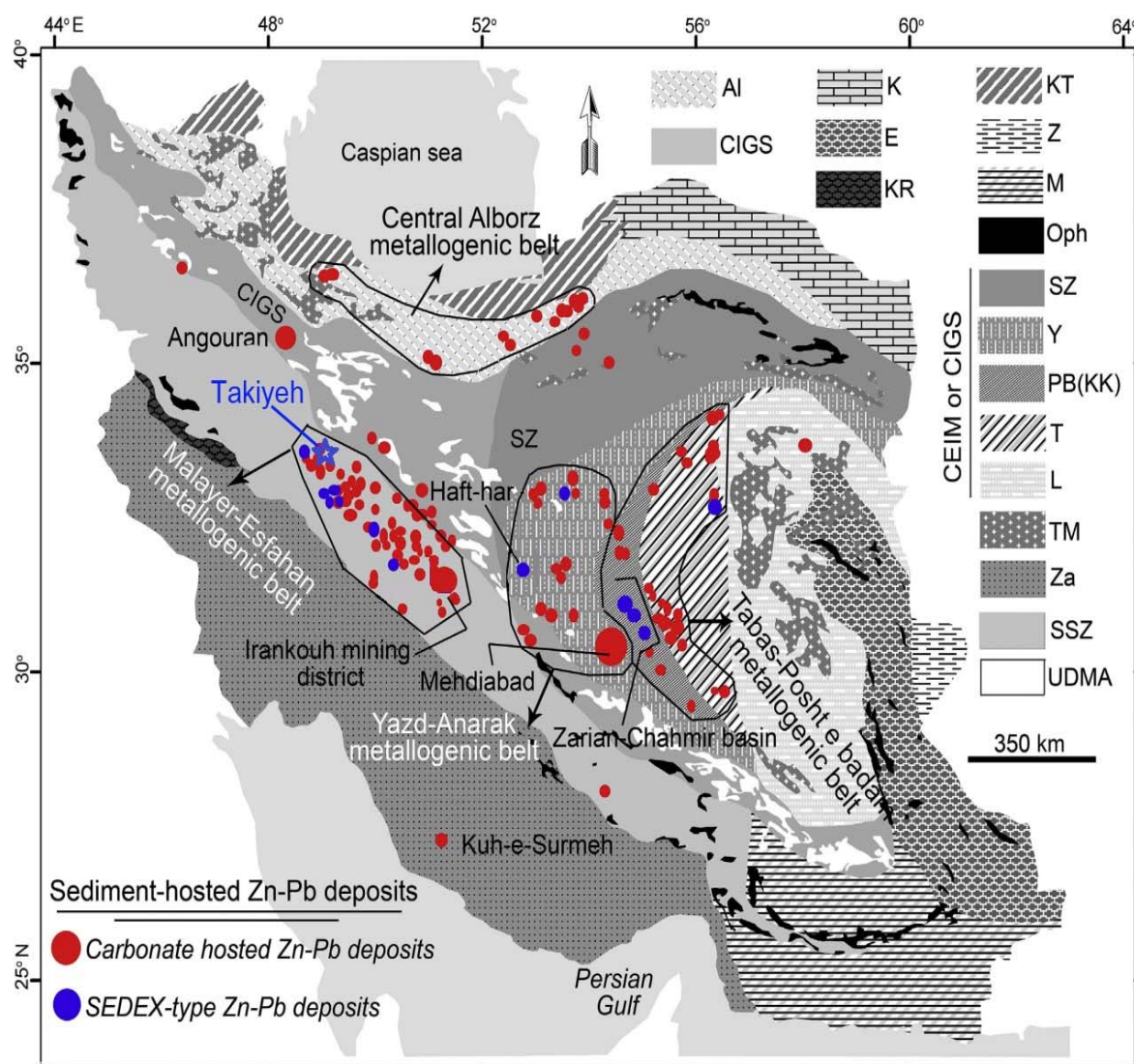
کمربند فلززایی ملایر - اصفهان یکی از محورهای معدنی بزرگ سرب و روی ایران است و در پهنه سندانج - سیرجان قرار گرفته است (Karimpour and Sadeghi, 2018). این کمربند با طول تقریبی ۳۵۰ کیلومتر و عرض بیش از ۵۰ کیلومتر، روند شمال‌باختری - جنوب‌خاوری دارد (Rajabi et al., 2012).

(شکل ۱). با توجه به اهمیت کانسارهای سرب و روی در این

کمربند، بررسی‌های متعددی در زمینه کانه‌زایی، الگوی اکتشافی و منشأ کانسار بر روی آنها انجام شده است (Esmaeili, Sevieri et al., 2019; Karimpour et al., 2019; Niroomand et al., 2019). به طور کلی، سنگ‌های کربناته کرتاسه‌زیرین کمربند فلززایی ملایر - اصفهان میزبان تعداد زیادی کانسار سرب و روی هستند (Ehya et al., 2010; Rajabi et

کربناته و سیلتستون‌های کرتاسه زیرین تا بالایی تشکیل شده‌اند (Rajabi et al., 2019).

اما به طور دقیق اغلب این کانسارها در ماسه سنگ و شیل‌های ژوراسیک و سنگ‌های



شکل ۱. نقشه پهنه‌بندی ساختاری ایران و موقعیت کانسارهای سرب و روی (با تغییرات جزئی از رجبی و همکاران ۲۰۱۲). موقعیت معدن تکیه در بخش شمال‌باختری کمر بند فلزایی ملایر-اصفهان با ستاره آبی‌رنگ نشان داده شده است. (Al: پهنه البرز، CIGS: پهنه ساختاری-زمین‌شناسی ایران مرکزی، E: کمر بند خاور ایران، K: کپه‌داغ، KR: زیرپهنه رادیولاریتی کرمانشاه، KT: پهنه ساختاری خزر-تالش-زیوه، L: بلوک لوت، M: پهنه مکران، Oph: کمر بند افیولیتی، PB: بلوک پشت‌بادام، SSZ: پهنه سندر-ج-سیرجان، T: بلوک طبس، TM: سنگ‌های ماگمایی تریشری، UDMA: کمان ماگمایی ارومیه-دختر، Y: بلوک یزد، Z: منطقه زابل، Za: کمر بند زاگرس)

Fig. 1. Structural zoning map of the Iran and location of the Zn-Pb deposits (modified after Rajabi et al., 2012). The location of the Takiyeh mine in the northwestern part of the Malayer-Esfahan metallogenic belt is shown in blue. (E: East Iran ranges, K: Kopet-Dagh; KR: Kermanshah Radiolarites subzone, KT: Khazar-Talesh-Ziveh structural zone, L: Lut block, M: Makran zone, Oph: ophiolite belts, PB: Posht-e-Badam block, SSZ: Sanandaj-Sirjan zone, T: Tabas block, TM: tertiary magmatic rocks, UDMA: Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Y: Yazd block, Z: Zabol area, Za: Zagros ranges)

از نظر جایگاه زمین‌ساختی، حوضه کششی پشت کمانی بین سنندج- سیرجان و خرده قاره ایران مرکزی در زمان کرتاسه زیرین شرایطی مناسب برای تشکیل کانسارهای سرب و روی با میزبان رسوبی در کمربند فلززایی ملایر- اصفهان فراهم کرده است (Niroomand et al., 2019). ادامه هم‌گرایی و برخورد میان صفحه‌های عربی و اوراسیا باعث بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس شده (Mohajjel and Fergusson, 2014) و پدیده زمین‌ساخت وارون در زمان کرتاسه پایانی در پهنه سنندج- سیرجان باعث فعالیت دوباره گسل‌های نرمال قدیمی، به ویژه گسل‌های حوضه کششی پشت کمان شده است (Agard et al., 2005).

زمین‌ساخت وارون نقش بسزایی در دگرشکلی و فعالیت مجدد گسل‌های نرمال قدیمی سرزمین ایران داشته است (Zanchi et al., 2008; Yassaghi and Madanipour, 2006). فرایند زمین‌ساخت وارون در کمربندهای کوه‌زایی باعث تبدیل شدن گسل‌های کششی به گسل‌های راندگی شده است و این راندگی‌ها اغلب جابه‌جایی‌های زیادی را متحمل شده و سفره‌های راندگی را تشکیل می‌دهند (Sylvester and Smith, 1976; Harding and Lowell, 1979). با توجه به نقش سیستم گسل‌ها و به ویژه گسل‌های وارون‌شده در پهنه سنندج- سیرجان، در این پژوهش، نقش این ساختارها در تکوین معدن تکیه مورد بررسی قرار گرفته است. این معدن در بخش‌های شمال‌باختری کمربند فلززایی ملایر- اصفهان (شکل ۱) در استان مرکزی و در مجاور روستای تکیه واقع شده است. به طور کلی، کانه‌زایی سرب و روی در کانسار تکیه با ماهیت چینه‌کران تا چینه‌سان در میزبان آهک‌های دولومیتی واحد Ksl تشکیل شده است (شکل A-۲). هدف از این پژوهش، تعیین نقش زمین‌ساخت وارون در تشکیل پهنه‌های گسلی و شکستگی‌های موجود در معدن تکیه و ارتباط کلی آنها با کانه‌زایی است.

روش مطالعه

به طور کلی، فعالیت‌های اکتشافی در معدن تکیه علاوه بر تهیه

نقشه‌ها، شامل حفر ترانشه‌های فراوان، چاهک، گمانه‌های حفاری پودری و مغزه‌گیری، حفر کارگاه‌های استخراجی- اکتشافی، حفر تونل‌های اکتشافی و استخراجی است. در این پژوهش برای بررسی ارتباط بین ساختارهای زمین‌ساختی و کانه‌زایی در معدن سرب و روی تکیه، ابتدا گسل‌های محدوده معدن با استفاده از تصویرهای ارتوفوتو (عکس‌های هوایی گرفته‌شده به وسیله پهباد) استخراج شده است (شکل B-۲). این تصویرها با دقت بسیار زیاد، عوارض زمین‌شناختی را به خوبی نمایان می‌کنند. سپس برای بررسی هندسه و جنبش‌شناختی گسل‌ها، در چندین مرحله برداشت‌های صحرایی انجام شده است. در بررسی‌های صحرایی ترانشه‌های حفر شده و تونل‌های اکتشافی معدن، سطوح جدید گسلی را در معرض دید قرار داده و کمک زیادی به شناسایی دقیق عملکرد گسل‌ها کرده است. برای بررسی کانه‌زایی نیز از بررسی‌های کانه‌نگاری، طیف‌سنج XRD (شناسایی کانه‌های ثانویه سرب و روی) و تجزیه دستگاهی XRF (جدول ۱) از بخش‌های با عیار متفاوت استفاده شد. کلیه آزمایش‌ها در شرکت زرآزما تهران انجام شد.

ویژگی‌های ساختاری پهنه سنندج- سیرجان

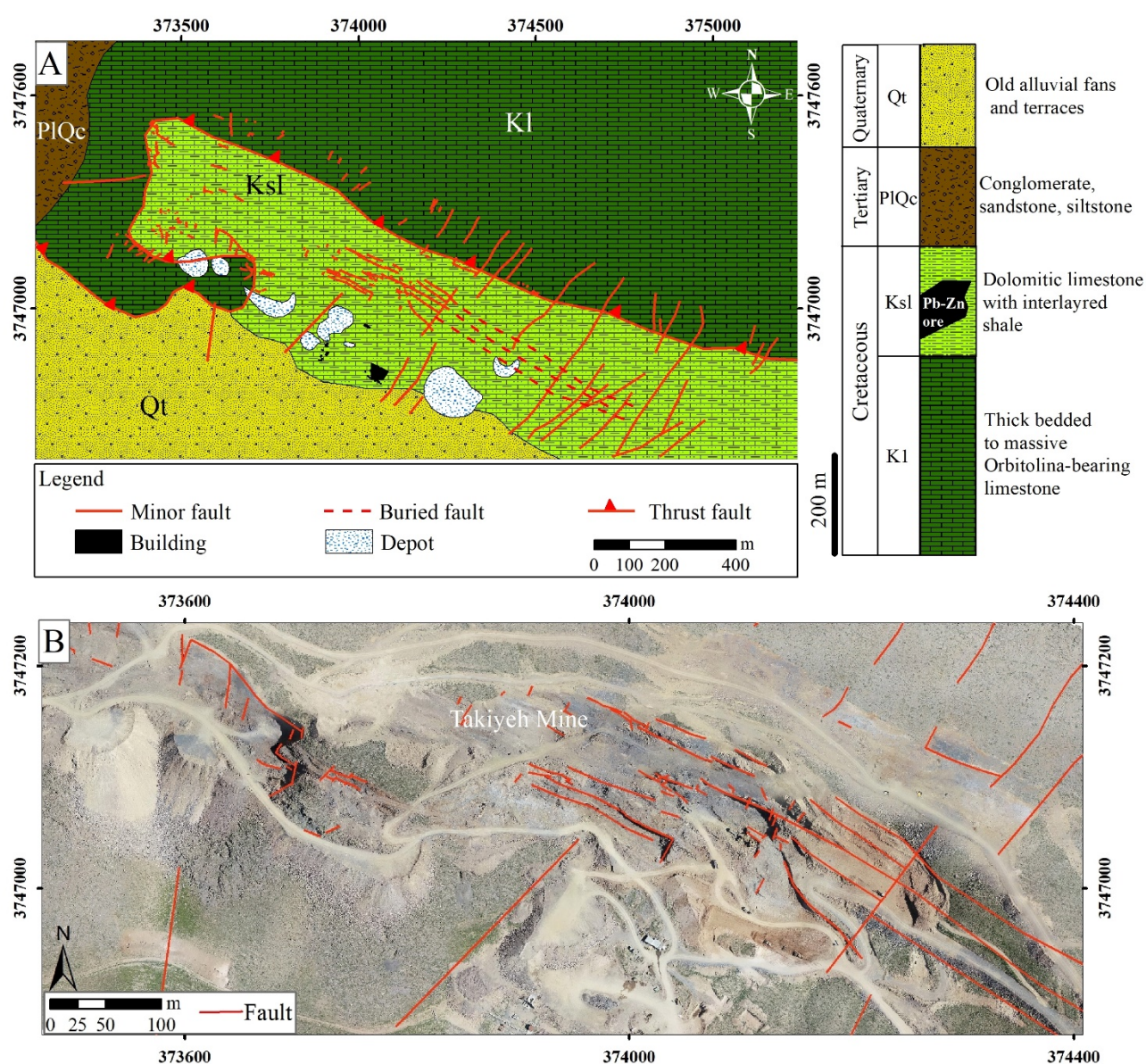
معدن تکیه از لحاظ تقسیم‌بندی ساختاری در پهنه سنندج- سیرجان قرار گرفته است. این پهنه به طور کلی شامل یک توالی چینه‌شناسی، سنگ‌های آتشفشانی و دگرگونی، کمپلکس‌های نفوذی آذرین است که بین پهنه زمین‌درز زاگرس و کمان ماگمایی ارومیه- دختر قرار گرفته است (Ahmadi Khalaji et al., 2007; Shahbazi et al., 2010; Mahmoudi et al., 2012; Esna Ashari et al., 2011).

پهنه سنندج- سیرجان از لحاظ تکامل زمین‌شناسی، وضعیت رسوب‌گذاری و ساختاری، ویژگی‌های به‌خصوصی دارد که در دوران مزوزوئیک و سنوزوئیک ناپیوستگی‌هایی در توالی چینه‌ای آن دیده می‌شود (Agard et al., 2005; Ghasemi and Talbot, 2006; Mohajjel and Fergusson, 2014).

تکوین پهنه سنندج- سیرجان با دو الگوی زمین‌ساختی

پیشین (محیط کششی) ایجاد شده‌اند و سپس به صورت راندگی‌ها فلسی و یا دوپلکس فعال شده‌اند (Agard et al., 2005).

ستبرپو سته^۱ و نازک پو سته^۲ قابل توجیه است که در الگوی اول گسل‌ها، عمیق و پی‌سنگی بوده و هم پوشش رسوبی و هم پی‌سنگ در دگرشکلی شرکت می‌کنند. دگرشکلی پی‌سنگ به علت فعالیت دوباره این گسل‌های عمیق است که در مراحل



شکل ۲. A: نقشه زمین‌شناسی و ستون چینه‌شناسی معدن تکیه با برون‌زد واحدهای کرتاسه زیرین و نهشته‌های پلیوسن و کواترنری و B: تصویر ارتوفتو معدن تکیه

Fig. 2. Geological map and stratigraphic column of the Takiyeh mine with the outcrops of the Cretaceous units and Pliocene and Quaternary deposits, and B: Orthophoto image of the Takiyeh mine

1. Thick-Skinned Tectonics
2. Thin-Skinned Tectonics

در الگوی نازک پوسته پهنه سنج- سیرجان از ورقه‌های راندگی نازک و کم‌شیب با رفتار شکل پذیر و شکننده تشکیل شده که سنگ‌های دگرگونی رده‌ها کیلومتر از سمت شمال‌خاور به سمت جنوب‌باختر رانده است. این راندگی‌ها دارای سبک پشت‌خوکی^۱ هستند. هر سیستم راندگی در هر زمان که تشکیل شده است، ساخت‌های پیشین را بریده، جابه‌جا کرده و ورقه‌های راندگی پیچیده‌ای را ایجاد کرده است (Alavi, 1994).

جدول ۱. نتایج آنالیز XRF بر روی سه نمونه کم عیار، متوسط عیار و پرعیار از رگه‌های سیلیسی کانه‌دار معدن تکیه (نتایج برحسب درصد وزنی)

Table 1. Results of XRF analysis in low, medium and high grade in silicified ore-bearing veins of the Takiyeh mine (based on wt.%)

Sample	Low-grade	Medium-grade	High-grade
SiO ₂	64.3	64.4	42.98
Al ₂ O ₃	4.98	3.05	2.83
Fe ₂ O ₃	6.14	6.2	7.27
CaO	5.1	4.08	5.32
Na ₂ O	N	N	0.01
K ₂ O	1.11	0.67	0.59
MgO	0.305	0.13	0.14
PbO	1.5	1.79	2.55
ZnO	8.1	11.3	21.2
TiO ₂	0.24	0.16	0.17
MnO	0.27	0.22	0.46
P ₂ O ₅	0.04	0.02	0.03
SO ₃	0.38	0.45	0.608
L.O.I	6.5	7.3	14.01

چینه‌شناسی

برون‌زد سطحی محدوده معدن تکیه از واحدهای آهک اربیتولین‌دار ضخیم‌لایه تا توده‌ای (Kl) با ضخامت تقریبی ۵۰۰ متر و آهک دولومیتی همراه میان‌لایه‌های نازکی از شیل (Ksl) با ضخامت تقریبی ۴۰۰ متر تشکیل شده است. پس از این واحدهای سنگی رخنمونی از کنگلومرا و ماسه‌سنگ پلیوسن (PIQc) با ناپیوستگی بر روی آنها تشکیل شده است. در نهایت

بخش‌هایی از این واحدها توسط آبرفت‌های کواترنری (Qt) پوشیده شده است (شکل ۲- A). واحد Kl مربوط به پیشروی دریا در آغاز کرتاسه زیرین است که اغلب دارای درز و شکستگی در جهت‌های مختلف بوده و ارتفاعات محدوده معدن را تشکیل می‌دهند. طبق بررسی‌های صحرایی، بخش عمده‌ای از کانه‌زایی سرب و روی با ماهیت چینه‌کران (رگه و رگچه‌های سیلیسی کانه‌دار) در سنگ میزبان آهک دولومیتی واحد Ksl

رخ داده است. تمامی واحدهای رخنمون یافته در معدن تکیه روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری با شیب در حدود ۳۰ درجه به سمت شمال‌خاوری دارند. سنگ میزبان دولومیتی واحد Ksl در محدوده معدن تکیه، اغلب دارای امتداد N60W و شیب ۶۰ تا ۷۰ درجه به سمت شمال‌خاوری داشته و افق‌های میزبان کانه‌زایی ضخامتی بین ۰/۵ تا ۲ متر دارند.

کانه‌زایی معدن تکیه

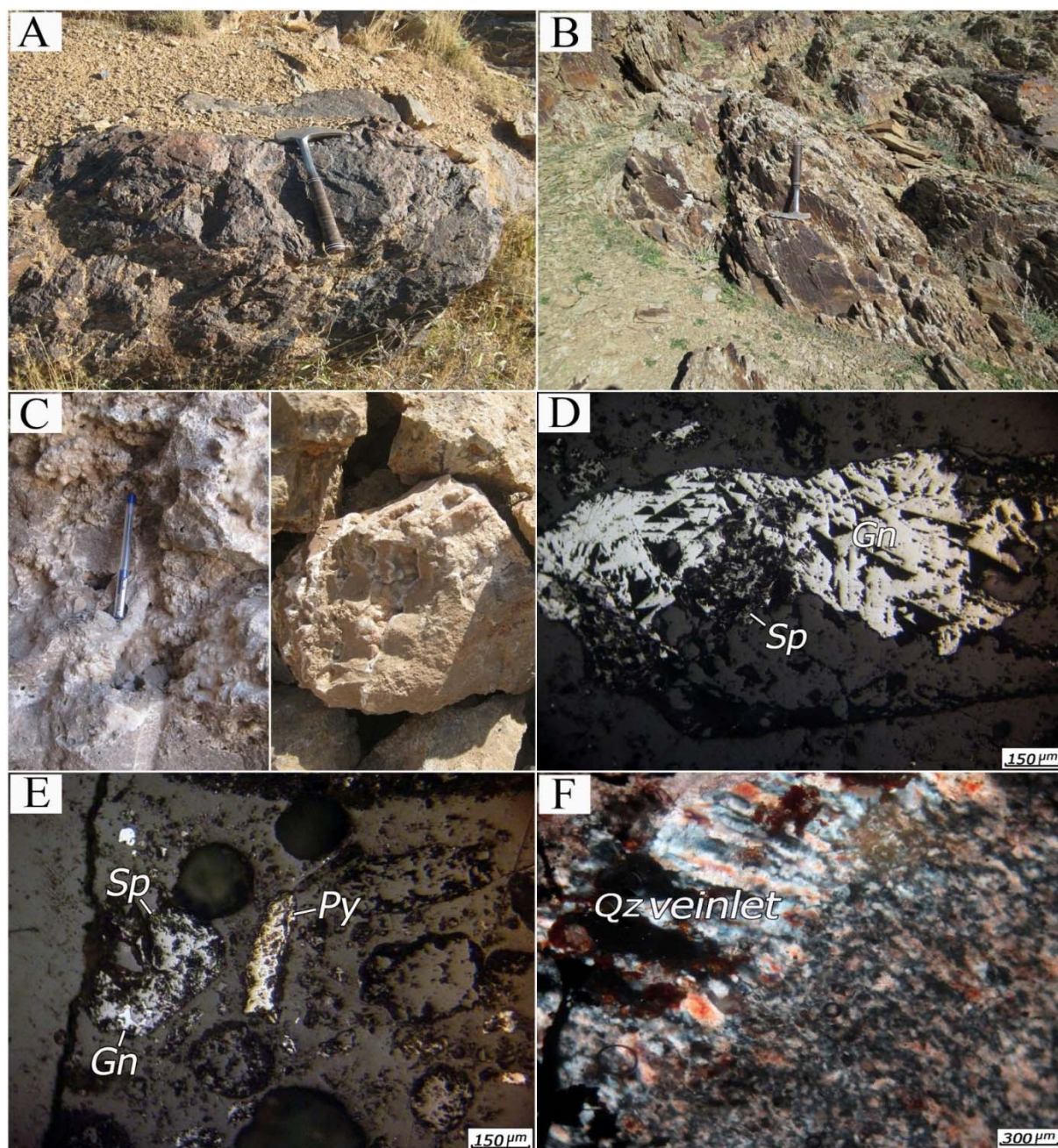
کانه‌زایی سرب و روی در معدن تکیه به دو شکل کانه‌های اولیه (سولفیدی) و ثانویه (کربناتی و سیلیکاتی) سرب و روی تشکیل شده است. کانه‌های سولفیدی اغلب در عمق دیده می‌شوند؛ اگرچه گاهی در بخش‌های نزدیک به سطح زمین نیز در برخی از رگه‌ها حضور دارند. کانه‌زایی دارای ارزش اقتصادی در معدن تکیه، سرب و روی بوده که عیار متوسط روی ۴ درصد و عیار متوسط سرب ۲ درصد است. میزان تناژ معدن تکیه ۲۴۰۰۰۰ تن کانسنگ روی- سرب تخمین زده شده است (Hosseinkhani, 2013). کانه‌زایی در معدن تکیه با ماهیت چینه‌کران در سنگ آهک دولومیتی رخ داده است. رگه‌های دارای کانه‌زایی ضخامتی بین ۰/۵ تا ۲ متر و بیشینه طول ۲۰۰ متر دارند. در این افق‌ها ماده معدنی اغلب با باطله کوارتز همراه است که به صورت توده‌های سیلیسی رخنمون دارد (شکل ۳-۱). این توده‌ها در سیستم‌های گسلی به موازات لایه‌بندی سنگ میزبان و با روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری با شیب در حدود ۶۰ تا ۷۰ درجه به سمت شمال‌خاوری تشکیل شده‌اند.

بر اساس بررسی‌های کانه‌نگاری، کانه‌های ثانویه شامل کانه‌های کربناتی- سیلیکاتی روی و همچنین کانه‌های کربناته سرب هستند که فراوانی بیشتری نسبت به کانه‌های سولفیدی دارند. طبق شواهد طیف‌سنج پراش پرتو ایکس^۱، این کانه‌ها اغلب شامل کالامین، همی‌مورفیت، زینسیت و سروزیت هستند. در زون‌های دارای کانه‌های سولفیدی، گالن و اسفالریت غالب بوده (شکل ۳-۲) و پیریت نیز به شکل پراکنده دیده می‌شود (شکل

۳-۱). رگه‌های دارای کانه‌زایی سرب و روی در سطح دارای اکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت) هستند. در کران بالای واحد سنگ آهک دولومیتی، کانه‌زایی باریت نیز به رگه‌ها اضافه می‌شود. همچنین، عناصر نقره، منگنز و مس به عنوان عناصر فرعی در معدن تکیه حضور دارند. دگرسانی در کانسار تکیه شامل دولومیتی‌شدن و سیلیسی‌شدن است. دگرسانی دولومیتی در سنگ میزبان رگه‌ها و احتمالاً قبل از تشکیل کانه‌ها رخ داده است. سیلیسی‌شدن دگرسانی هم‌زمان با کانی‌سازی بوده و مرتبط با ساختار گسل‌هاست. انواع مختلفی از ساخت و بافت در کانسنگ مشاهده می‌شود. در مقیاس نمونه دستی اغلب ساخت‌های برشی، حفره پرکن و رگه- رگچه‌ای دیده می‌شود. در مقیاس میکروسکوپی نیز بافت‌های دانه پراکنده و جانشینی (شکل ۳-۲)، جانشینی گالن توسط اسفالریت (شکل ۳-۳) رگچه کوارتز به همراه کانی‌های کدر گالن و اسفالریت (شکل ۳-۴) تشخیص داده شد.

زمین‌ساخت وارون

زمین‌ساخت وارون پدیده‌ای رایج در نواحی برخوردی قاره‌ای است و نقشی اساسی در تکامل کمربندهای کوه‌زایی دارد (Quintana et al., 2006; Yassaghi and Madanipour, 2008). در طی زمین‌ساخت وارون فعالیت مجدد گسل‌های نرمال به صورت گسل‌های معکوس درآمده و دگرشکلی زیادی در فرودپواره و فرادیواره این گسل‌ها رخ می‌دهد (Coward, 1994). شیب گسل‌های معکوس حاصل از زمین‌ساخت وارون زمانی که به سطح زمین نزدیک می‌شوند، زیادتر می‌شود. در نواحی که وارونگی به صورت مورب است؛ به دلیل تعدیل کرنش در فرادیواره و شکستگی این بخش، گسل‌های پس‌راندگی تشکیل می‌شوند و با اتصال به گسل اصلی، ساختار بالآمده را ایجاد می‌کنند (Konstantinovskaya et al., 2007) (شکل ۴-۱). ساختار بالآمده اغلب باعث بالآمدن و برون‌زد سازندهای قدیمی در سطح می‌شود و یک شاخص مهم از وارون‌شدگی است (Saura and Teixell, 2006).

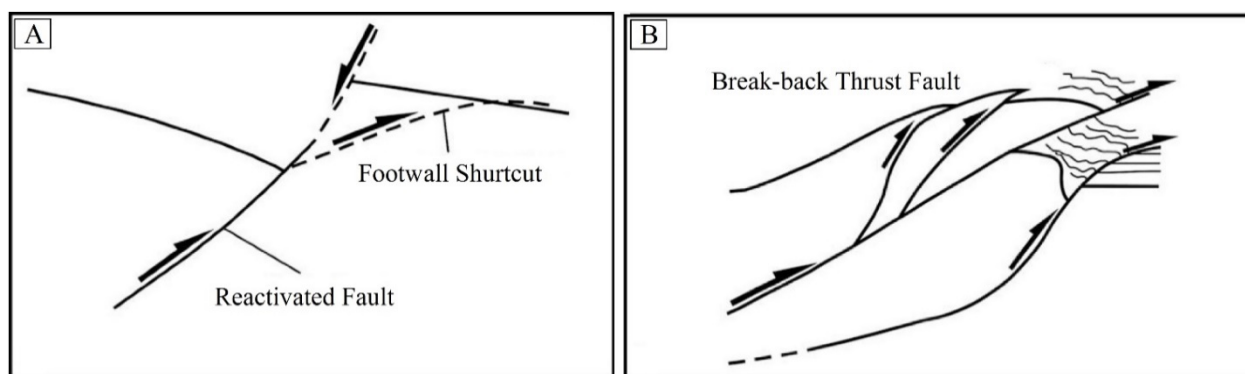


شکل ۳. A: نمایی از رگه سیلیسی دارای کانه‌زایی سرب و روی در معدن تکیه، B: واحد سنگ آهک دولومیتی میزبان رگه‌های کانه‌زایی در معدن تکیه، C: ساخت برشی از سنگ میزبان آهک دولومیتی، D: تصویر میکروسکوپی نور بازتابی عادی از رگه گالن و اسفالریت در سنگ میزبان آهک دولومیتی، E: تصویر میکروسکوپی نور بازتابی عادی از بافت جانشینی گالن توسط اسفالریت همراه پیریت دانه‌پراکنده و F: تصویر میکروسکوپی نور عبوری متقاطع از رگچه کوارتز به همراه کانی‌های کدر گالن و اسفالریت. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Qz: کوارتز، Py: پیریت، Gn: گالن، Sp: اسفالریت).

Fig. 3. A: Pb-Zn mineralization in silicic vein of the Takiyeh mine, B: Dolomitic limestone hosted the mineralization veins of the Takiyeh mine, C: Breccia texture in dolomitic limestone host rock, D: Photomicrographs reflected light of galena and sphalerite vein within dolomitic limestone, E: Photomicrographs reflected light from replacement of galena with sphalerite associated with disseminated pyrite, and F: Photomicrographs transmitted light of quartz veinlet with the galena and sphalerite opaque minerals. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Sp: Sphalerite, Gn: Galena, Py: Pyrite, Qz: Quartz).

تشکیل سفره‌های راندگی می‌شود. سفره راندگی در واقع ورقه‌ای زمین‌ساختی بزرگ و دارای یک سطح با شیب اغلب کم است که در طول آن جابه‌جایی زیاد زمین‌ساختی سنگ‌های فرادیواره رخ می‌دهد (Wiltschko, 1981).

علاوه بر تشکیل گسل‌های پس‌راندگی در فرادیواره، در فرودیواره گسل نرمال وارون‌شده، گسل‌های راندگی میان‌بر^۱ تشکیل می‌شوند (Coward, 1994; Butler et al., 2006) (شکل ۴-B). علاوه بر نقش زمین‌ساخت وارون در مناطق برخوردی قاره‌ای، جابه‌جایی‌های زیاد گسل‌های راندگی باعث



شکل ۴. A: هندسه یک گسل نرمال معکوس شده پرسیب و تشکیل یک گسل میان‌بر در فرودیواره و B: تشکیل پس‌راندگی در فرادیواره گسل نرمال معکوس شده طی زمین‌ساخت وارون (Coward, 1994)

Fig. 4. A: The geometry of a steep inverted normal fault and the formation of a shortcut fault in the footwall, and B: formation of the back-thrust in hangingwall of the inverted normal fault during the inversion tectonic (Coward, 1994).

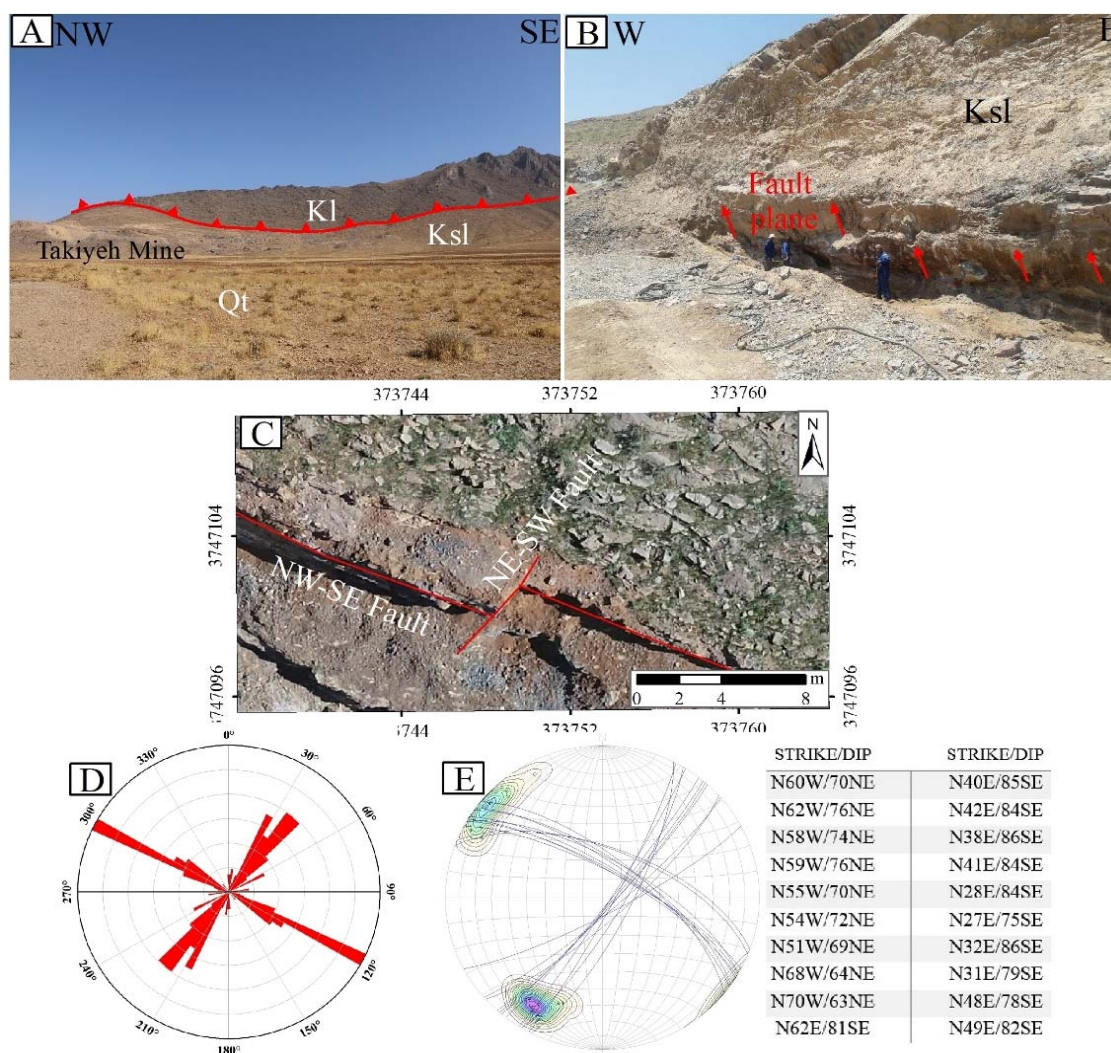
بحث و بررسی

هستند که روند شمال‌باختری - جنوب‌خاوری دارند. بر اساس تجزیه نمونه‌های سنگی XRF (جدول ۱) از رگه‌های سیلیسی کانه‌دار که در این گسل‌ها تشکیل شده‌اند، عیارهای بالایی از روی (۲۱/۲ درصد وزنی) و سرب (۲/۵۵ درصد وزنی)، به دست آمد. همچنین روند اصلی و مهم دیگری که همراه با کانه‌زایی است، روند شمال‌خاوری - جنوب‌باختری است. گسل‌های با روند شمال‌خاوری - جنوب‌باختری جوان‌تر بوده و در بخش‌هایی از منطقه مورد بررسی، گسل‌های شمال‌باختری - جنوب‌خاوری را قطع کرده‌اند (شکل ۵-C). به طور دقیق، راستای گسل‌های اصلی محدوده معدن، بیشترین فراوانی را در روندهای N60W و همچنین N30E تا N50E دارند (شکل ۵-D). این دو روند اصلی گسل‌های معدن که همراه با کانه‌زایی هستند، شیب‌های متفاوتی دارند. بنابراین برای بررسی ویژگی‌های ساختاری، شیب

به‌طور کلی کانه‌زایی سرب و روی در معدن تکیه به شکل رگه‌هایی در سنگ میزبان آهک دولومیتی (واحد Ksl) رخ داده که فرایندهای زمین‌ساختی بعدی باعث رانده شدن واحد کربناته KI بر روی این واحد شده است (شکل ۵-A). کانه‌زایی در این معدن به صورت رگه‌های کوچک با ضخامت چند سانتی‌متر تا حدود ۲ متر و در راستای گسل‌های اصلی معدن و به موازات لایه‌بندی تشکیل شده است (شکل ۵-B). در این پژوهش، برای بررسی دقیق گسل‌های معدن تکیه از برداشت‌های صحرایی دقیق و بررسی تصویرهای ارتوفتو تهیه شده به وسیله پهباد استفاده شده است. با توجه به نمودار گل سرخی ترسیم شده بر اساس امتداد صفحه‌های گسلی، گسل‌های معدن دو روند اصلی دارد. یکی از این روندها، گسل‌هایی همراه با کانه‌زایی به صورت رگه‌ای

گسلی و قطب های مربوط به گسل های شمال خاوری- جنوب باختری نشان می دهد که این گسل ها اغلب شیبی بین ۷۵ تا ۸۵ درجه به سمت جنوب خاوری دارند (شکل ۵- E).

و جهت شیب این گسل ها بر روی نمودار استریوگرام ترسیم شده است. چنان که قطب این صفحه های گسلی بر روی استریوگرام نشان می دهد، شیب گسل های شمال باختری- جنوب خاوری، بین ۶۰ تا ۷۰ درجه به سمت شمال خاوری است. همچنین صفحه های

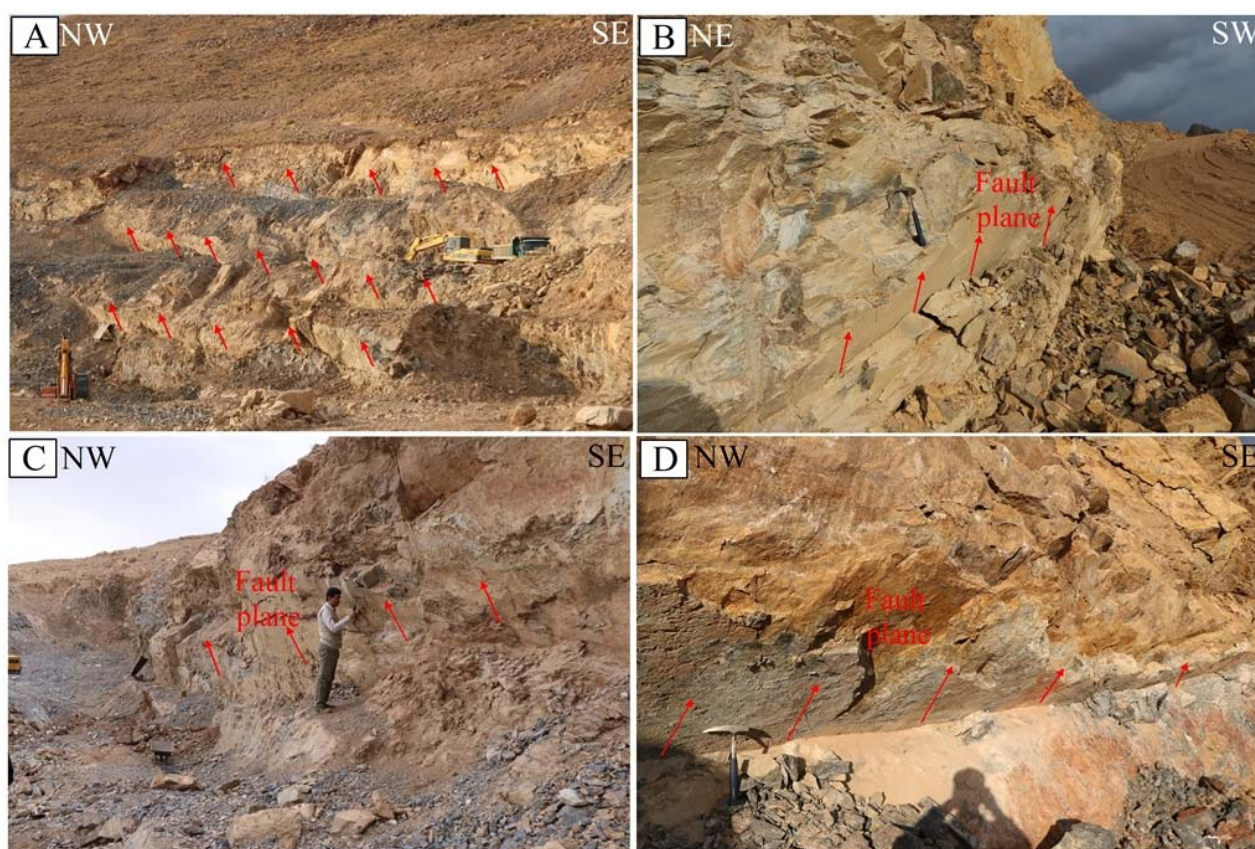


شکل ۵. A: نمایی از معدن سرب و روی تکیه و رخنمون واحدهای کرتاسه زیرین، B: تشکیل رگه های سرب و روی در راستای گسل های اصلی معدن، C: تصویر ارتوفتو از جابه جایی گسل های شمال باختری- جنوب خاوری به وسیله گسل های شمال خاوری- جنوب باختری در معدن تکیه، D: نمودار گل سرخی گسل های معدن تکیه و E: شیب و امتداد گسل های محدوده معدن تکیه و استریوگرام آنها. علائم اختصاری از واعظی پور و خلقی (Vaezipour and Kholghi, 1986) اقتباس شده است. Kl: آهک ضخیم لایه و توده ای، Ksl: آهک دولومیتی، Qt: آبرفت های کواترنری).

Fig. 5. A: View of the Takiyeh Zn-Pb mine and outcrop of the Cretaceous units, B: Formation of the Zn-Pb veins along the major faults of the mine, C: Orthophoto image showing displacement of NW-SE fault by NE-SW fault in the Takiyeh mine, D: Rose diagram of the Takiyeh mine faults, and E: Dip and strike of the Takiyeh mine faults and related stereogram. Abbreviations after Vaezipour and Kholghi (1986) (Kl: Thick bedded to massive limestone, Ksl: Dolomitic limestone, Qt: Quaternary deposits).

شیب به سمت شمال خاوری است (شکل ۶-۲). ویژگی های هندسی و جنبشی این گسل ها، با عملیات های استخراجی بیشتر در معرض دید قرار گرفته و سازو کار آنها به طور دقیق قابل بررسی است. (شکل ۶-۳). پهنه برشی تشکیل شده در راستای این گسل ها جهت حرکت به سمت جنوب باختری را نشان می دهد (شکل ۶-۴).

در معدن تکیه گسل های شمال باختری - جنوب خاوری که به موازات لایه بندی تشکیل شده اند، اغلب الگوی موازی نشان می دهند (شکل ۶-۱). این گسل ها که کنترل کننده اصلی کانه زایی در معدن هستند، در بخش های بدون کانه زایی هستند. با توجه به شاخص های صفحه گسلی از جمله جهت زبری و نرمی سطح گسلی باقی مانده، سازو کار این گسل ها معکوس با



شکل ۶. A: الگوی موازی گسل های با روند شمال باختری - جنوب خاوری و شکل گیری رگه های معدنی در راستای آنها در معدن تکیه، B: گسل های معکوس بدون کانه زایی، C: گسل های همراه با کانه زایی در محدوده معدن تکیه و D: پهنه های برشی ناشی از حرکت صفحه گسلی با راستای شمال باختری - جنوب خاوری

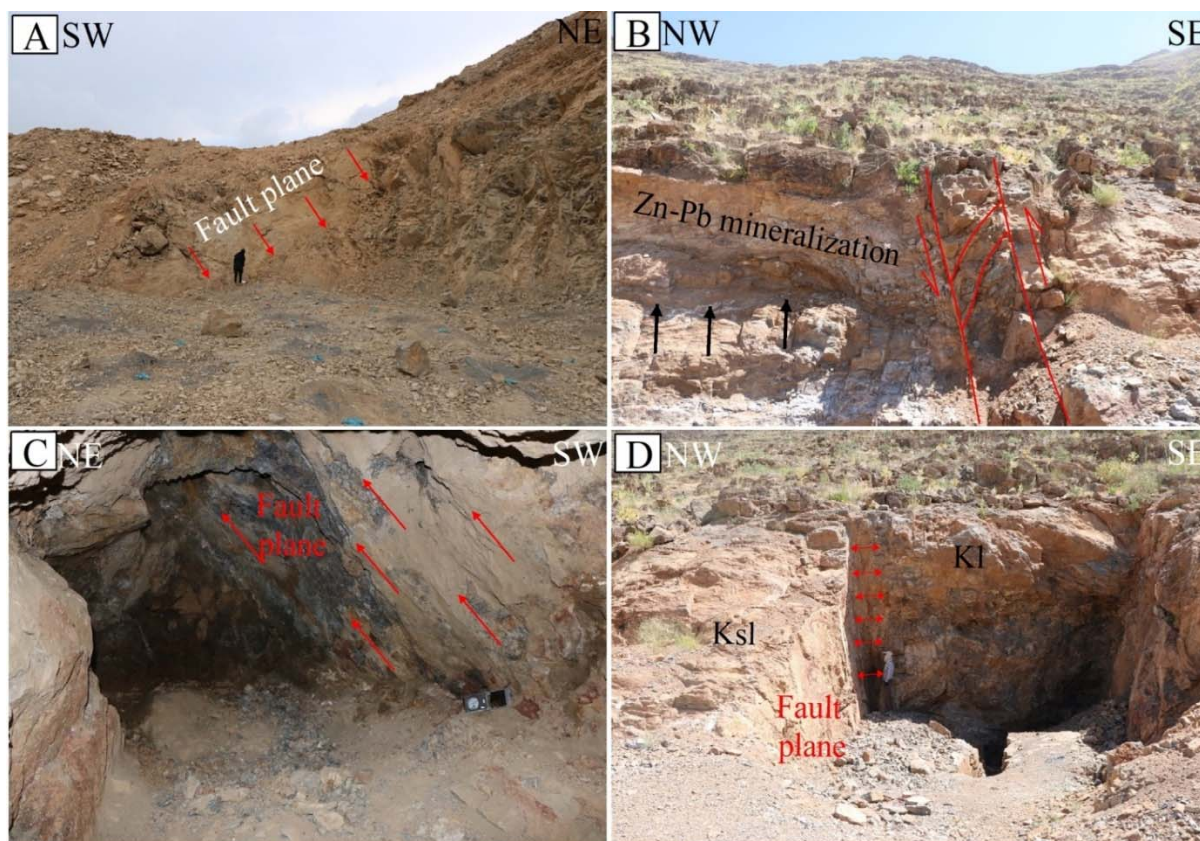
Fig. 6. A: Parallel pattern of the NW-SE trend faults and formation of mineral veins along them in the Takiyeh mine, B: reverse fault without mineralization, C: faults with mineralization in the Takiyeh mine, and D: Shear zones due to movements of the NW-SE fault

قرار گرفته است (شکل ۶-۱). در مرز بین دو واحد آهک دولومیتی Ksl و واحد آهکی تیره Kl، گسل های شمال خاوری -

در محدوده معدن تکیه برون زد صفحه گسل های شمال خاوری - جنوب باختری با عملیات استخراجی بیشتر در معرض دید

کرده است (شکل ۷-۷). گسل های شمال خاوری- جنوب باختری در بخش هایی از معدن با تشکیل برش گسلی دیده می شوند. پهنای این منطقه برشی تا حدود ۵۰ سانتی متر نیز رسیده و در راستای آنها رگه های معدنی تشکیل شده است. این رگه ها تا مرز بین دو واحد آهک دولومیتی Ksl و واحد آهکی Kl ادامه داشته و با توجه به ناهمبندی بودن واحد آهکی Kl به درون این واحد ادامه پیدا نمی کنند (شکل ۷-۷).

جنوب باختری، رگه های معدنی با روند شمال باختری- جنوب خاوری را قطع کرده و باعث جابه جایی آنها شده اند. همچنین فابریک SC تشکیل شده و جهت حرکت دیواره ها با توجه به زاویه حاده تشکیل شده، تأییدی بر سازوکار معکوس گسل های شمال خاوری- جنوب باختری است (شکل ۷-۷). با توجه به اهمیت این گسل ها که باعث جابه جایی و قطع شدن رگه های معدنی شده اند، حفر تونل های اکتشافی در معدن، کمک زیادی به شناسایی هندسه و جنبش شناسی این گسل ها



شکل ۷. A: صفحه های گسلی با روند شمال خاوری- جنوب باختری و الگوی موازی در معدن تکیه، B: گسل پرشیب که باعث جابه جایی رگه شده است و فابریک SC تشکیل شده نشان دهنده حرکت معکوس آن است، C: رخنمونی از گسل معکوس با راستای شمال خاوری- جنوب باختری در تونل اکتشافی معدن تکیه و D: پهنه برشی حدود ۵۰ سانتی متری در اثر عملکرد گسل معکوس با راستای شمال خاوری- جنوب باختری. علائم اختصاری از واعظی پور و خلغی (Vaezipour and Kholghi, 1986) اقتباس شده است (Kl: آهک ضخیم لایه و توده ای، Ksl: آهک دولومیتی).

Fig. 7. A: Fault planes with a NE-SW trend and a parallel pattern in the Takiyeh mine, B: Steep fault that causes vein displacement and formed SC fabric reflecting reverse mechanism, C: Outcrop of a NE-SW reverse fault in an exploration tunnel in the Takiyeh mine, and D: A shear zone of about 50 cm in width is formed due to the activity of the NE-SW reverse fault. Abbreviations after Vaezipour and Kholghi (1986) (Kl: Thick bedded to massive limestone, Ksl: Dolomitic limestone).

چنان‌که اشاره شد، کانسارهای سرب و روی کمربند فلززایی ملایر- اصفهان در پهنه سهندج- سیرجان، در محیط کششی و حوضه پشت‌کمانی کرتاسه زیرین تشکیل شده است (Rajabi et al., 2019; Niroomand et al., 2019).

فازهای فشارشی بعدی ناشی از برخورد صفحه‌های قاره‌ای اوراسیا و عربی و به ویژه زمین‌ساخت وارون، این پهنه را تحت تأثیر قرارداده است (Agard et al., 2005). با توجه به این که معدن تکیه در کمربند فلززایی ملایر- اصفهان قرار داشته، کانه‌زایی سرب و روی در طی فازهای کششی کرتاسه زیرین تشکیل شده است. شرایط کششی محیط باعث شده است که علاوه بر کانه‌زایی در راستای گسل‌ها، بخشی از کانه‌زایی گسترش لایه‌ای داشته باشد. در واقع، گسل‌های نرمال و گسل‌های موازی با لایه‌بندی، کنترل‌کننده مهاجرت سیالات کانه‌ساز بوده و در راستای این گسل‌ها و شکستگی‌ها کانه‌زایی تشکیل شده است. این کانه‌زایی در نهشته‌های کرتاسه زیرین و آهک دولومیتی Ksl جای‌گیری کرده است. موضوع مهم در مورد گسترش لایه‌ای کانه‌زایی در معدن تکیه این است که گسل‌های موازی لایه‌بندی (گسل‌های شمال‌باختری- جنوب‌خاوری در منطقه مورد بررسی) به علت لغزش بین لایه‌ای و در بین لایه‌های واحد Ksl تشکیل شده است. بنابراین چنان‌که در شکل A-5 مشاهده می‌شود، عمده کانه‌زایی در معدن به موازات لایه‌های واحد Ksl و در راستای گسل‌های موازی لایه‌بندی تشکیل شده است.

مسئله قابل توجه این است که تشکیل کانه‌زایی در یک محیط کششی و در نتیجه فازهای کوه‌زایی بعدی و به ویژه فازهای کوه‌زایی کرتاسه بالایی مثل فاز کوه‌زایی لارامید تحت تأثیر فشارش قرار گرفته است. بنابراین با عملکرد پدیده زمین‌ساخت وارون در پیرامون این معدن و مناطق اطراف، گسل‌های نرمال با زاویه کم تا متوسط به گسل‌های معکوس تبدیل شده‌اند. در شمال‌خاوری منطقه مورد بررسی توالی از واحد Ksl و واحد Kl برون‌زد دارند که شواهدی از گسلش نرمال در واحد Ksl دیده می‌شود که این توالی با ادامه دگرریختی دچار چین‌خوردگی

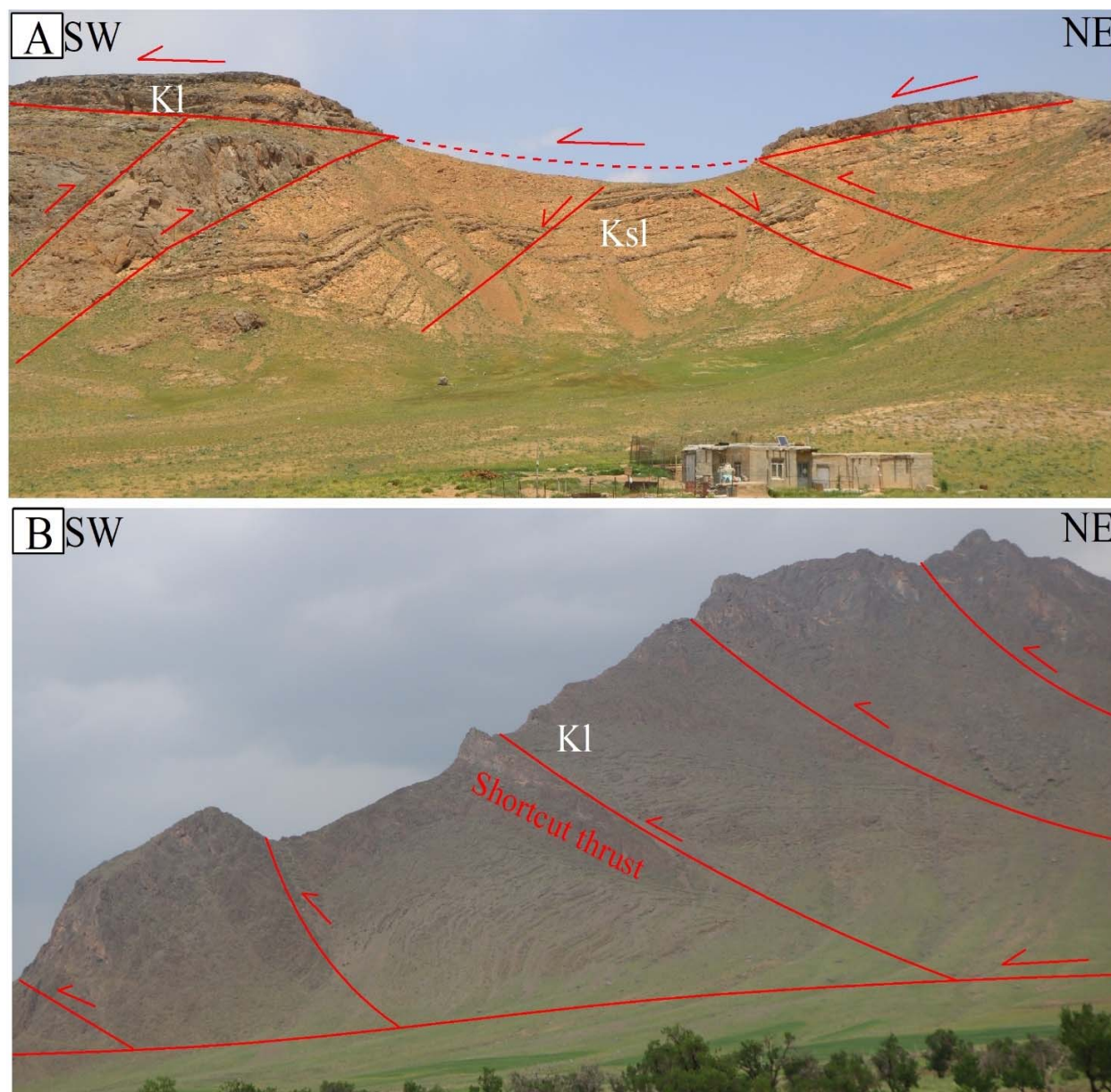
شده و سپس واحد Kl به وسیله گسل‌های راندگی بر روی واحد Ksl رانده شده است (شکل A-8).

چنان‌که ذکر شد، یکی از عوامل نشان‌دهنده زمین‌ساخت وارون، وجود راندگی‌های میان‌بر است که این گسل‌های میان‌بر در بخش باختری معدن تکیه و در واحد‌های آهکی کرتاسه با راستای شمال‌باختری- جنوب‌خاوری و با شیب به سمت شمال‌خاوری دیده می‌شوند (شکل B-8). در واقع این گسل‌های میان‌بر معکوس و پرشیب، گسل‌های نرمالی بوده‌اند که ابتدا تحت رژیم‌های کششی کرتاسه زیرین تشکیل شده و سپس تحت تأثیر فازهای فشارشی بعدی به گسل‌های معکوس تبدیل شده‌اند. اکنون این گسل‌های نرمال معکوس شده که با کانه‌زایی همراه هستند، در معدن تکیه به صورت رگه‌هایی با روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری دیده می‌شوند.

زمین‌ساخت وارون در محدوده معدن تکیه علاوه بر تشکیل راندگی‌های میان‌بر، باعث دگرریختی لایه‌های واحد Ksl شده و با پیشرفت دگرشکلی گسلش معکوس پرشیب و چین‌خوردگی‌های مضاعف تشکیل شده است. ساختارهای چین‌خورده در منطقه مورد بررسی در واحدهای شیلی شکل‌پذیر به صورت چین‌های Z شکل کوچک بین پهنه‌های برشی گسلی تشکیل شده‌اند (شکل A-9).

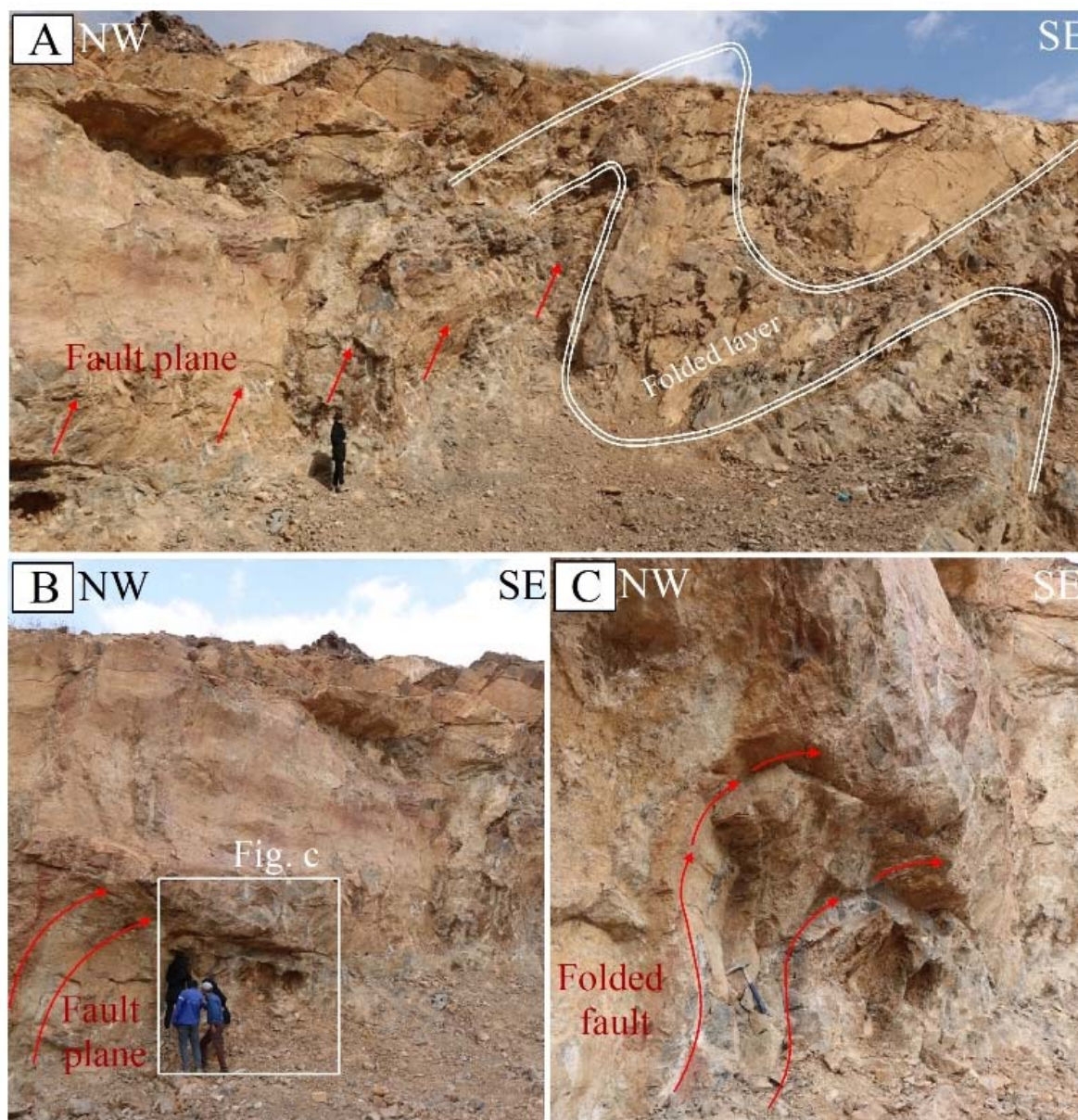
چنان‌که در شکل A-6 نشان داده شد، پهنه‌های گسلی بزرگ در محدوده معدن با الگوی موازی تشکیل شده و در برخی موارد بین این پهنه‌های گسلی موازی چین‌خوردگی‌های کوچک تشکیل شده است. نکته مهم در مورد عملکرد این ساختارهای چین‌خورده، ترتیب این ساختارها نسبت به گسل‌های منطقه است. این ساختارهای چین‌خورده بین پهنه‌های گسلی موازی و ناشی از عملکرد این گسل‌ها تشکیل شده‌اند؛ اما در بخش‌هایی از معدن، برخی گسل‌های کوچک قدیمی‌تر از این چین‌خوردگی‌ها برون‌زد دارند. ترانشه‌های معدن از این گسل‌های قدیمی اطلاعاتی ارزشمند می‌دهند که با ادامه دگرریختی و در واقع با پیشرفت دگرریختی چین‌خورده‌اند (شکل B-9). این گسل‌های قدیمی که بین لایه‌های واحد Ksl

و احتمالاً با سازوکار لغزش بین لایه‌ای تشکیل شده‌اند، در مراحل پیشرفته زمین‌ساخت وارون دچار چین‌خوردگی شده که لغزش‌های قدیمی را نیز در خود ثبت کرده‌اند (شکل ۹- C).



شکل ۸. A: گسلش نرمال در واحد Ksl در شمال‌خاوری معدن تکیه که به وسیله چین‌خوردگی دچار دگرریختی شده و با ادامه دگرریختی واحد Kl بر روی واحد Ksl رانده شده است و **B:** تشکیل راندگی‌های میان‌بر به علت عملکرد زمین‌ساخت وارون در معدن تکیه. علائم اختصاری از واعظی‌پور و خلقی (Vaezipour and Kholghi, 1986) اقتباس شده است (Kl: آهک ضخیم لایه و توده‌ای، Ksl: آهک دولومیتی).

Fig. 8. A: The normal faulting in the Ksl unit at the northeast of the Takiyeh mine, which is deformed by folding and calcareous Kl unit is thrust over the Ksl unit during the progressive deformation, and **B:** Formation of the shortcut thrust due to the inversion tectonic in Takiyeh mine. Abbreviations after Vaezipour and Kholghi (1986) (Kl: Thick bedded to massive limestone, Ksl: Dolomitic limestone).



شکل ۹. A: تشکیل ساختارهای چین خورده کوچک و Z شکل بین پهنه‌های گسلی موازی در معدن تکیه، B: سطوح گسلی قدیمی در واحد Ksl و C: چین خوردگی گسل‌های قدیمی با ادامه دگرختی در معدن تکیه

Fig. 9. A: Formation of small Z-shaped folded structures between the parallel fault zones in the Takiyeh mine, B: Old fault plane in the Ksl unit, and C: Folding of the old faults with progressive deformation in the Takiyeh mine

نتیجه‌گیری

کربناتی و در بخش‌های عمقی، کانه‌زایی درون‌زاد سولفیدی غالب است. در محدوده معدن دو دسته گسل اصلی با روند شمال‌خاوری - جنوب‌باختری و شمال‌باختری - جنوب‌باختری کانه‌زایی سرب و روی را کنترل کرده‌اند. روند بیشترین فراوانی گسل‌های اصلی N60W و همچنین N30E تا N50E است و

کانه‌زایی سرب و روی در معدن تکیه به صورت رگه‌های کوچک چند سانتی‌متری تا چند متری و در راستای گسل‌ها تشکیل شده است. کانه‌زایی به دو شکل سولفیدی درون‌زاد و کربناتی برون‌زاد وجود دارد. در سطح زمین، کانه‌زایی برون‌زاد

بخش باختری معدن برونزد دارند. این راندگی ها در واحدهای آهکی کرتاسه با روند شمال باختری- جنوب خاوری و با شیب کم به سمت شمال، باعث دگرریختی این واحدها شده اند. علاوه بر راندگی های میانبر، ساختارهای چین خورده در محدوده معدن بین پهنه های گسلی موازی تشکیل شده اند. برخی گسل های کوچک نیز قدیمی تر از ساختارهای چین خورده بوده و با پیشرفت دگرریختی دچار چین خوردگی شده اند.

شاخص های صفحه گسلی نشان می دهند که این گسل ها معکوس و پرشیب هستند. گسل های شمال خاوری- جنوب باختری، گسل هایی با روند شمال باختری- جنوب خاوری را قطع کرده اند و جوان تر هستند.

پدیده زمین ساخت وارون در محدوده معدن سرب و روی تکیه و مناطق اطراف، گسل های نرمال با زاویه کم تا متوسط را به گسل های معکوس تبدیل کرده است. شواهد زمین ساخت وارون در منطقه مورد بررسی، وجود راندگی های میانبر است که در

References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros, Iran: Constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences*, 94(3): 401–419. <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0481-4>
- Ahmadi Khalaji, A., Esmaeily, D., Valizadeh, M.V. and Rahimpour-Bonab, H., 2007. Petrology and geochemistry of the granitoid complex of Boroujerd, Sanandaj-Sirjan Zone, Western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(1): 859–877. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.06.005>
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations. *Tectonophysics*, 229(3–4): 211–238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2)
- Butler, R.W.H., Tavarnelli, E. and Grasso, M., 2006. Structural inheritance in mountain belts: an Alpine-Apennine perspective. *Journal of Structural Geology*, 28(11): 1893–1908. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.09.006>
- Coward, M., 1994. Inversion tectonics. In: P.L. Hancock, (Editor), *Continental Tectonics*. Pergamon, Oxford, pp. 289–304.
- Ehya, F., Lotfi, M. and Rasa, I., 2010. Emarat carbonate-hosted Zn–Pb deposit, Markazi Province, Iran: A geological, mineralogical and isotopic (S, Pb) study. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(2): 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.08.007>
- Esmaeili Sevieri, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Mahboubi, A., 2019. Knowledge-driven Approach to Exploration of Carbonate Hosted Zinc and Lead Deposits, Case study: North Irankuh district, Isfahan – Iran. *Journal of Economic Geology*, 11(4): 565–602. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v11i4.79111>
- Esna Ashari, A., Tiepolo, M., Valizadeh, M.V., Hassanzadeh, J. and Sepahi, A.A., 2012. Geochemistry and zircon U–Pb geochronology of Aligoodarz granitoid complex, Sanandaj-Sirjan zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 43(1): 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.09.001>
- Ghasemi, A. and Talbot, C., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Science*, 26(6): 683–693. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.01.003>
- Harding, T. and Lowell, J.D., 1979. Structural styles, their plate-tectonic habitats, and hydrocarbon traps in petroleum provinces. *AAPG bulletin*, 63(7): 1016–1058. <https://doi.org/10.1306/2F9184B4-16CE-11D7-8645000102C1865D>
- Hosseinkhani, A., 2013. *Geology of Takiyeh Zn–Pb mine (Shazand, Markazi province)*. Sormak Mining Company, Tehran, Report 1, 76 pp.
- Hou, Z. and Zhang, H., 2015. Geodynamics and

- metallageny of the eastern Tethyan metallogenic domain. *Ore Geology Review*, 70(1): 346–384.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.10.026>
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Alaminia, Z., Esmaeili Sevieri, A. and Stern, C.R., 2019. New hypothesis on time and thermal gradient of subducted slab with emphasis on dolomitic and shale host rocks in formation of Pb-Zn deposits of Irankuh Ahangaran belt. *Journal of Economic Geology*, 10(2): 677–706. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v10i2.76528>
- Karimpour, M.H. and Sadeghi, M., 2018. Dehydration of hot oceanic slab at depth 30–50 km: KEY to formation of Irankuh-Emarat PbZn MVT belt, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 194(1): 88–103.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.07.016>
- Konstantinovskaya, E.A., Harris, L.B., Poulin, J. and Ivanov, G.M., 2007. Transfer zones and fault reactivation in inverted rift basins: Insights from physical modelling. *Tectonophysics*, 441(1–4): 1–26.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.06.002>
- Mahmoudi, S., Corfu, F., Masoudi, F., Mehrabi, B. and Mohajjel, M., 2011. U–Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj–Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 238–49.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.03.006>
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2014. Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran. *International Geology Review*, 56(3): 263–287.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2013.853919>
- Niroomand, S., Haghi, A., Rajabi, A., Tabbakh Shabani, A.A. and Song, U.C., 2019. Geology, isotope geochemistry, and fluid inclusion investigation of the Robat Zn–Pb–Ba deposit, Malayer-Esfahan metallogenic belt, southwestern Iran. *Ore Geology Review*, 112(1): 103040.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103040>
- Rajabi, A., Mahmoodi, P., Rastad, E., Niroomand, S., Canet, C., Alfonso, P. and Yarmohammadi, A., 2019. Comments on “Dehydration of hot oceanic slab at depth 30–50 km: Key to formation of Irankuh-Emarat Pb–Zn MVT belt, Central Iran” by Mohammad Hassan Karimpour and Martiya Sadeghi. *Journal of Geochemical Exploration*, 205(1): 106346.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106346>
- Rajabi, A., Rastad, E. and Canet, C., 2012. Metallogeny of Cretaceous carbonate hosted Zn–Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Review*, 54(14): 1649–1672.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2012.659110>
- Saura, E. and Teixell, A., 2006. Inversion of small basins: effects on structural variations at the leading edge of the Axial Zone antiformal stack (Southern Pyrenees, Spain). *Journal of Structural Geology*, 28(11): 1909–1920.
<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.06.005>
- Shahbazi, H., Siebel, W., Pourmoafae, M., Ghorbani, M., Sepahi, A.A., Shang, C.K. and Vousoughi Abedini, M., 2010. Geochemistry and U–Pb zircon geochronology of the Alvand plutonic complex in Sanandaj–Sirjan Zone (Iran): new evidence for Jurassic magmatism. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(6): 668–683.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.04.014>
- Sylvester, A.G. and Smith, R.R., 1976. Tectonic transpression and basement-controlled deformation in San Andreas fault zone, Salton Trough, California. *AAPG Bulletin*, 60(12): 2081–2102.
<https://doi.org/10.1306/C1EA3A73-16C9-11D7-8645000102C1865D>
- Vaezipour, M.J. and Kholghi, M.H., 1986. Geological map of Varche, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wiltschko, D.V., 1981. Thrust sheet deformation at a ramp: summary and extensions of an earlier model. In: K.R. Mc Clay and N.J. Price (Editors), *Thrust and Nappe Tectonics*. The Geological Society of London, London, pp. 55–65.
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1981.009.01.06>
- Yassaghi, A. and Madanipour, S., 2008. Influence of a transverse basement fault on along-strike

variations in the geometry of an inverted normal fault: Case study of the Mosha Fault, Central Alborz Range, Iran. *Journal of Structural Geology*, 30(12): 1507–1519.
<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.08.006>

Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi, M.R. and Sabouri, J., 2006. Inversion tectonics in central Alborz, Iran. *Journal of Structural Geology*, 28(11): 2023–2037.
<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.06.020>

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



How to cite this article

Alipoor, R., Hajiloo, S.Z. and Hosseinkhani, A., 2021. Structural analysis of the Takiyeh Zn-Pb mine in the Malayer-Esfahan metallogenic belt, west Iran. *Journal of Economic Geology*, 13(3): 627–643. (in Persian with English abstract) <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i3.86454>



Structural analysis of the Takiyeh Zn-Pb mine in the Malayer-Esfahan metallogenic belt, west Iran

Reza Alipoor^{1*}, Seyedeh Zahra Hajiloo¹ and Ahmad Hosseinkhani²

1) Department of Geology, Faculty of Basic Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2) Sormak Mining Company, Tehran, Iran

Submitted: Apr. 18, 2020

Accepted: Apr. 17, 2021

Keywords: *Inversion tectonic, Mineralization, Shortcut thrust, Sanandaj-Sirjan, Takiyeh Mine*

Introduction

The Malayer-Esfahan metallogenic belt is one of the main Zn-Pb mineral regions of Iran which is in the central part of the Sanandaj-Sirjan zone (Rajabi et al., 2012). The Sanandaj-Sirjan zone has long-lived magmatism and deformation related to the Mesozoic subduction and the middle Miocene collision. The rocks in this zone are the most highly deformed ones in the Zagros orogen (Mohajjel and Fergusson, 2014). Most of the sediment-hosted Zn-Pb deposits of the Malayer-Esfahan metallogenic belt are hosted within extensive Early Cretaceous platform carbonates deposited during an extensional back-arc basin (Rajabi et al., 2012). As the Zn-Pb deposits were initially formed in an extensional setting, subsequent compressional phases of the Eurasian and Arabian continental collision have deformed these deposits. It is the inversion tectonic phase that has played an important role in the evolution of the orogenic belts (Zanchi et al., 2006). In this study, the role of fault systems especially the inverted faults in the Takiyeh Mine has been studied. This mine is located in the NW part of the Malayer-Esfahan metallogenic belt, close to the Takiyeh village.

Materials and methods

In this study, faults of the area were distinguished using orthotrophic images to investigate the relationship between tectonic structures and mineralization in the Takiyeh Zn-Pb mine. Geometry and kinematics of these faults have been studied during several field observations. Then, the

study of polished sections, Zn-Pb analysis from all sections of the mine and XRF and XRD methods have been done for ore mineralization.

Discussion

The Zn-Pb mineralization in the Takiyeh mine occurs in the Ksl ore-bearing unit of the Lower Cretaceous. The Kl unit is thrust over the Ksl unit during the compressional phases of the continental collision between the Arabian-Eurasian plates. Mineralization is composed of mineral veins of several centimeters to several meters along the main faults of the study area. Generally speaking, two systems of faults with NE-SW and NW-SE trends have caused deformation and controlled mineralization in the Takiyeh mine. The faults with NE-SW trend cut the NW-SE trend faults, indicating activation of the NE-SW faults in a new stress field. The main fault trends of the study area are most frequent in the N60W and N30E to N50E trends. The dip angle of the NW-SE trend faults generally change between 60 to 70 degrees toward the northeast. These faults are generally steep reverse faults due to the fault plane indicators such as direction of roughness and softness of fault surface. The dip angle of the NW-SE trend faults are generally toward the SW and these fault are exposed as steep fault zones. The SC fabric in these faults indicates reversed and steep movement, causing displacement of the NW-SE mineral veins.

Generally, mineralization in the Takiyeh mine has been formed during the Lower Cretaceous

*Corresponding author Email: rezaalipoor116@gmail.com

extensional phases. So, this region had experienced the extensional regime and normal faults have controlled the upward migration of the hydrothermal fluids and mineralization. Mineralization in the study area is hosted by the Lower Cretaceous unit (Ksl). It is noteworthy that the formation of Zn-Pb mineralization in an extensional setting and subsequent compressional orogeny phases, especially the middle and upper Cretaceous orogeny phases, such as the Laramide orogeny phase, has affected the area under compressional settings. Thus, the inversion tectonic in the study area inverted the low-angle normal faults to steep reverse faults. Generally, inversion tectonic is a common process in regions of continental collisional involving the reactivation of major extensional normal faults as reverse faults. Inversion of a normal fault causes deformation transfer to the fault footwall via shortcut thrusts. The outcrop of some shortcut thrusts in the western part of the Takiyeh mine are evidences of inversion tectonic in the study area. These shortcut faults with NW-SE trend and dip angle toward NE have caused deformation of the Cretaceous calcareous units. In fact, these reverse shortcut faults have been normal faults that formed initially under the Cretaceous extensional regimes and then they became inverted under later compressional phases. The inversion tectonics in the study area, in addition to the formation of shortcut thrusts, has deformed the Ksl unit and steep reverse fault and

folding has been formed by progressive deformation. The folded structures in the study area in ductile shaly units have been formed as small Z-shaped folds between fault shear zones. Although these folded structures have been formed between parallel fault zones, several minor faults older than these folds are exposed in some parts of the study area due to the activity of these faults. These older faults have been previously formed between the Ksl unit and were folds during the progressive stages of the inversion tectonic.

References

- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2014. Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran. *International Geology Review*, 56(3): 263–287.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2013.853919>
- Rajabi, A., Rastad, E. and Canet, C., 2012. Metallogeny of Cretaceous carbonate hosted Zn–Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Review*, 54(14): 1649–1672.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2012.659110>
- Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi, M.R. and Sabouri, J., 2006. Inversion tectonics in central Alborz, Iran. *Journal of Structural Geology*, 28(11): 2023–2037.
<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.06.020>