نقش کنترل کننده‌های چینه‌شناسی، سنگ‌شناسی و ساختاری درجایگیری کانسار سرب نخلک (شمال شرق اصفهان)

محمدعلی جزی

دانشجوی دکتری زمین شناسی اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد

محمدحسن کریم‌پور

گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد

آزاده ملک‌زاده شفارودی

گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد

بهنام رحیمی

دانشیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۳/۱/۲۳ *تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۲۶*

karimpur@um.ac.ir

چکیده

کانسار نخلک بصورت چینه‌کران و غیرهمزاد درون واحد کربناته کرتاسه بالایی قرار گرفته است. سد شیلی سازند عشین، در مجاورت محدوده کانی‌سازی، سیالات کانه‌دار را تا تهنشست ماده‌معدنی درون کربنات‌ها نگهدری نموده است. سنگ میزبان دارای خصوصیات مناسبی همچون حضور رخساره ریفی، انتقال از حالت آهک به دولستون و حضور دلومیت‌های گرمابی بوده که باعث افزایش تخلخل و نفوذپذیری شده است. شکستگی‌ها و گسل‌های نرمال دربردارنده کانی‌سازی، بصورت رگه‌های با شیب زیاد (۶۵-۹۰) و آزیموت ۸۵±۵ حضور دارند. گسل قلعه بزرگ، پهنه جابه‌جایی اصلی کانسار بوده که رگه‌ها با زاویه ۴۵±۵ درجه نسبت به آن قرار گرفته‌اند. با توجه به قراگیری کانی‌سازی در کمر بالای این گسل و نیز بالا بودن شدت کانی‌سازی درون و اطراف این گسل، می‌توان گسل قلعه بزرگ را به عنوان عامل اصلی ایجاد فضای خالی ساختاری و نیز معبر اصلی ورود سیالات کانه‌دار به درون سنگ‌های کرتاسه بالایی در نظر گرفت.

کلمات کلیدی: کانسار نخلک؛ کانی‌سازی؛ سد شیلی؛ دلومیت گرمابی گسل قلعه بزرگ.

مقدمه

بررسی ویژگی‌های کوه نخلک به عنوان میزبان یکی از بزرگترین و شاخص ترین کانسارهای غیر همزاد سرب و روی با سنگ میزبان سنگ‌های کربناته ایران، می‌تواند در شناخت و اکتشاف دیگر کانسارهای از این دست یاری دهنده و الگو باشد. سنگ میزبان نقش اساسی و مهمی در ته نشست و تمرکز موضعی ماده معدنی بویژه در کانسارهای غیرهمزاد دارا می‌باشد. سنگ میزبان هم از نظر خصوصیات شیمیایی همچون واکنش پذیر بودن (مانند سنگ آهک) و هم از نظر خصوصیات فیزیکی همچون ساختمان‌های اولیه (مانند سنگ آهک بانفوذپذیری بالا) و ساختمان‌های ثانویه (مانند گسل و شکستگی) در کنترل کانی‌سازی از اهمیت بالایی برخوردار است (کریم پور و سعادت، ۱۳۸۱). کنترل‌کننده‌های کانی‌سازی می‌تواند به عنوان فاکتور اساسی در قابلیت نقل و انتقال سیالات چه در مقیاس ناحیه‌ای و چه در مقیاس معدنی عمل نماید. این کنترل‌کننده‌ها باعث تمرکز و تجمع جریان سیال کانه‌دار شده تا فرصتی برای رخداد فرایندهای ته نشست ایجاد شود (Leach et al., 2005). بررسی نقش کنترل‌کننده‌های کانی‌سازی اعم از عوامل چینه‌شناسی، سنگ‌شناسی و ساختاری در جایگیری ماده‌معدنی کانسار نخلک و دیگر کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان کربناته ایران، بصورت جامع صورت نگرفته است. تشخیص اینکه چرا یک کانسار خاص در یک محیط معین تمرکز می‌یابد از نظر اکتشاف کانسارهای مشابه حائز اهمیت است (شهاب‌پور، ۱۳۸۰) و لذا هدف از این پژوهش بررسی عوامل اساسی در کنترل جایگیری کانسار سرب نخلک بوده تا الگویی برای کانسارهای مشابه ارائه گردد.

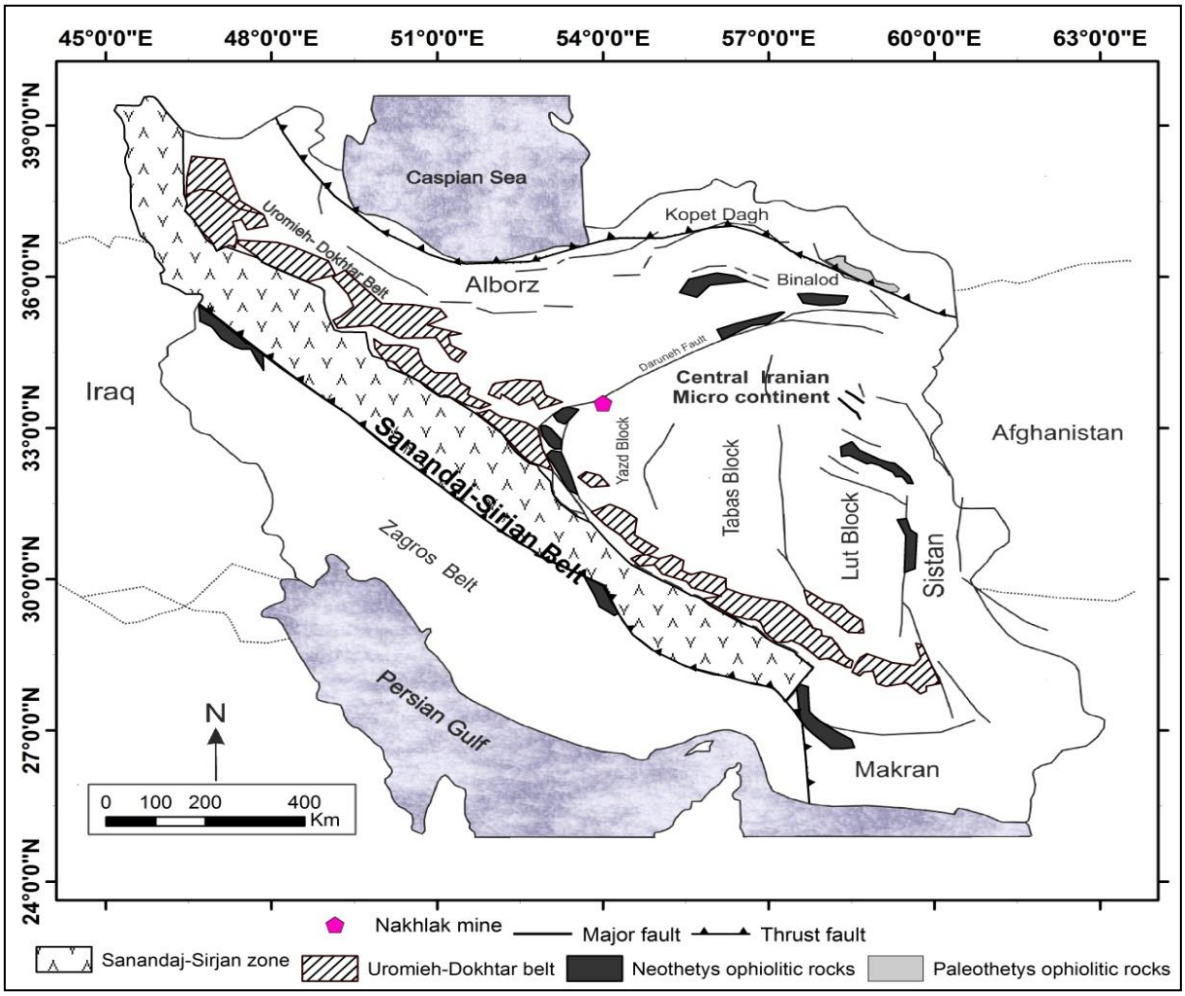
روش مطالعه

در این تحقیق عوامل موثر در تمرکز ماده‌معدنی و ایجاد کانسار سرب در کوه نخلک بررسی شده است. پس از انجام عملیات صحرایی بررسی‌های پتروگرافی و زمین‌شناسی ساختمانی انجام و نقشه کوه نخلک با مقیاس ۱/۲۰۰۰۰ تهیه گردید. تعداد ۵۰ نمونه از سنگ میزبان کانی‌سازی به جهت مطالعات سنگ‌شناسی و بررسی ارتباط سنگ میزبان و کانی‌سازی برداشت و از آن برای تهیه مقاطع نازک و نازک صیقلی استفاده گردید. ویژگی‌های ساختاری کوه نخلک اعم از گسل، چین‌خوردگی، درزه و شکستگی در طی عملیات صحرایی برداشت و به‌ویژه ارتباط ماده معدنی با این ساختارها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. در این راستا از مجموع ۲۱ ایستگاه امتداد بیش از ۵۱۰ درزه برداشت گردید؛ همچنین تعداد ۳۰ گسل درون سنگ‌های کرتاسه بالایی از نظرامتداد مولفه حرکتی و نقش در کانی‌سازی بررسی شده و امتداد بیش از ۵۰ رگه معدنی در طبقات مختلف معدن برداشت شده است. با توجه به نتایج بدست آمده به بررسی و سهم هریک از عوامل در جایگیری ماده‌معدنی پرداخته و مدل تشکیل کانسار نخلک ارائه خواهد شد.

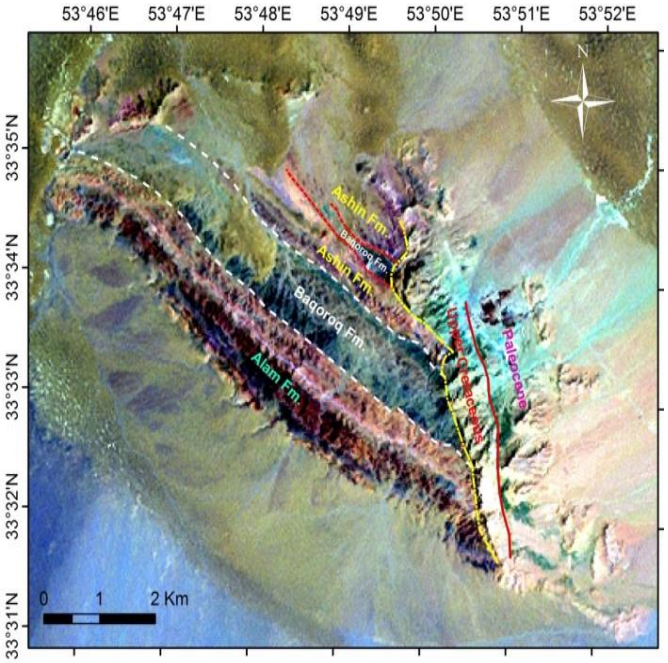
زمین‌شناسی منطقه

کوه نخلک با گستره‌ای بین طول‌های ″۳۰′۵۰°۵۳ تا ″۳۰′۵۰°۵۳ شرقی و عرض ″۴۰′۳۳°۳۳ تا ″۴۰′۳۳°۳۳ شمالی، در۱۲۰ کیلومتری شمال‌شرق نائین و ۵۵ کیلومتری شمال‌شرق انارک قرار دارد. این معدن در حاشیه شرقی رشته کوه نخلک قرار گرفته است. این رشته کوه به صورت مجزا در حاشیه

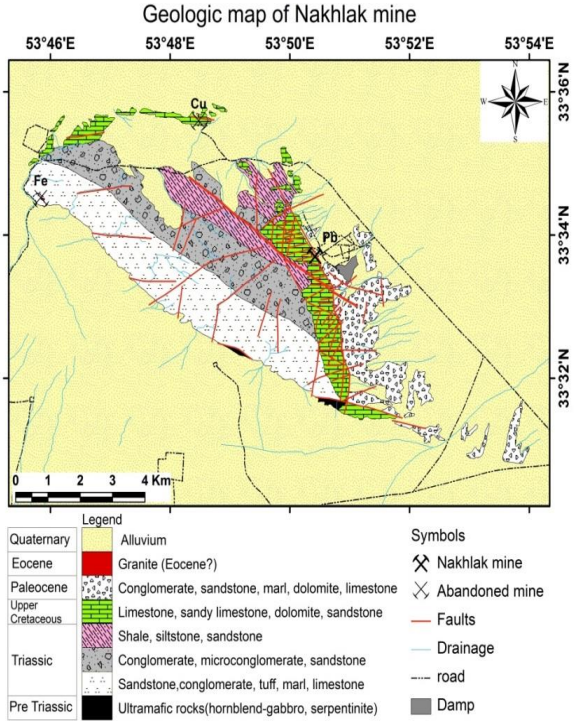
جنوبی کویر مرکزی ایران قرار گرفته و بدین واسطه اطراف آن توسط ماسه‌های بادی پوشیده شده است. به لحاظ تقسیم بندی‌های زمین‌شناسی کوه نخلک در خرد قاره ایران مرکزی و در بلوک یزد قرار گرفته است (شکل۱). کوه نخلک علارغم مساحت نسبتا کم (حدود ۲۵ کیلومتر مربع) یکی از نواحی بحث برانگیز چینه‌شناسی و تکتونیک صفحه‌ای ایران را در خود جای داده است (شکل۲). (Davoudzadeh and Seyed-Emami 1972; Ruttner 1993; Alavi et al. 1997; Seyed-Emami 2003; Balini et al., 2009). چینه‌شناسی این کوه شامل سنگ‌های الترامافیک قبل از تریاس، واحدهای سنگی تریاس (گروه نخلک)، واحد سنگی کربناته کرتاسه بالایی (واحد صدر)، واحد تخریبی-کربناتی پالئوسن (واحد خالد) و دایک و استوک گرانیتی ائوسن می‌باشد (شکل۳). در قسمت جنوبی کوه نخلک دو برونزد از سنگ‌های الترامافیک وجود دارد که با مرز گسلی در زیر سنگ‌های تریاس قرار گرفته‌اند (Holzer and Ghasemipour,1969). این سنگها شامل هورنبلند گابرو و سرپانتینیت می‌باشد که به عنوان جدا افتاده‌هایی از مجموعه افیولیتی (افیولیت تیپ نخلک) تفسیر شده است (Bagheri and Stampfli., 2008). تعیین سن دقیق این ها صورت نگرفته است ولی به سبب قرارگیری این سنگ‌ها به زیر سنگ‌های تریاس، این سنگ‌ها به قبل از تریاس نسبت داده شده اند (وزیری،۱۳۷۵). توالی تریاس با ضخامت ۲۴۰۰ متر با سن اولنکین- لادینین بالایی (Olenekian-Upper Ladinian) مشهور به گروه نخلک شامل سه سازند علم، باقرق و عشین می‌باشد (Balini et al., 2009).



شکل۱. پهنه‌های رسوبی-ساختاری عمده ایران، شکل اولیه با تغییرات از (Ruttner and Stöcklin 1967 ;Alavi 1991; Berberian and King, 1981)، علامت پنج ضلعی مکان معدن نخلک را روی نقشه نشان می‌دهد.



شکل۲. عکس ماهواره ای لندست از کوه نخلک ترکیب باندهای ۵-۳-۱



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی کوه نخلک (با تغییرات از Alavi et al., 1997)

سازند علم با ضخامت ۱۱۵۰ متر شامل آرنایت با قطعات سنگهای آتشفشانی (Volcanic aernite)، آهک نودول‌دار، مارن و توربیدایت است؛ سازند باقرق با ضخامت ۸۷۰ متر شامل مخروط افکنه‌های محیط رودخانه‌ای بوده و سنگ‌شناسی آن از کنگلومرا تا ماسه سنگ متغیر است. سازند عشین با ضخامت ۳۷۰ متر شامل توربیدیت‌های ریز دانه بوده که تحول سریع از محیط قاره‌ای سازند باقرق به یک محیط توربیدیتی عمیق دریایی با سنگ‌شناسی ماسه‌سنگ و شیل را به ثبت رسانده است (Zanchi et al., 2009) (شکل ۳). نمونه‌های سازند علم و اغلب نمونه‌های سازند عشین، موقعیت تکتونیکی قوس آتشفشانی (Volcanic arc) و نمونه‌های سازند باقرق منشا مرتبط با برونزد و فرسایش سنگ پایه (Basement) دگرگونه است (Zanchi et al., 2009). سنگ‌های محیط حاشیه فعال قاره‌ای توالی تریاس نخلک در تضاد با دیگر رسوبات کربناته پلت‌فرم هم سن خود (سازند الیکا و شتری) می‌باشند که در اغلب نقاط ایران نهشته شده‌اند (Alavi et al., 1997; Seyed-Emami., 2003; Balini et al., 2009). اطلاعات منشا همراه با دیگر شواهد همچون ضخامت زیاد رسوبات، تغییرات ناگهانی در رخساره، فراوانی مواد آذر آواری، رخداد توف و آتشفشانی متمایل به کالک آلکالن به این نکته اشاره دارد که سنگ‌های تریاس نخلک در طول یک حاشیه فعال در موقعیت جلو قوسی (Forearc) ایجاد شده است (Balini et al., 2009). توالی تریاس در طی کوهزایی سیمرین (قبل از کرتاسه) دچار دگرشکلی شده و توسط سنگ‌های کرتاسه بالایی غیر دگرشکل پوشیده شده است (balini et al., 2009).

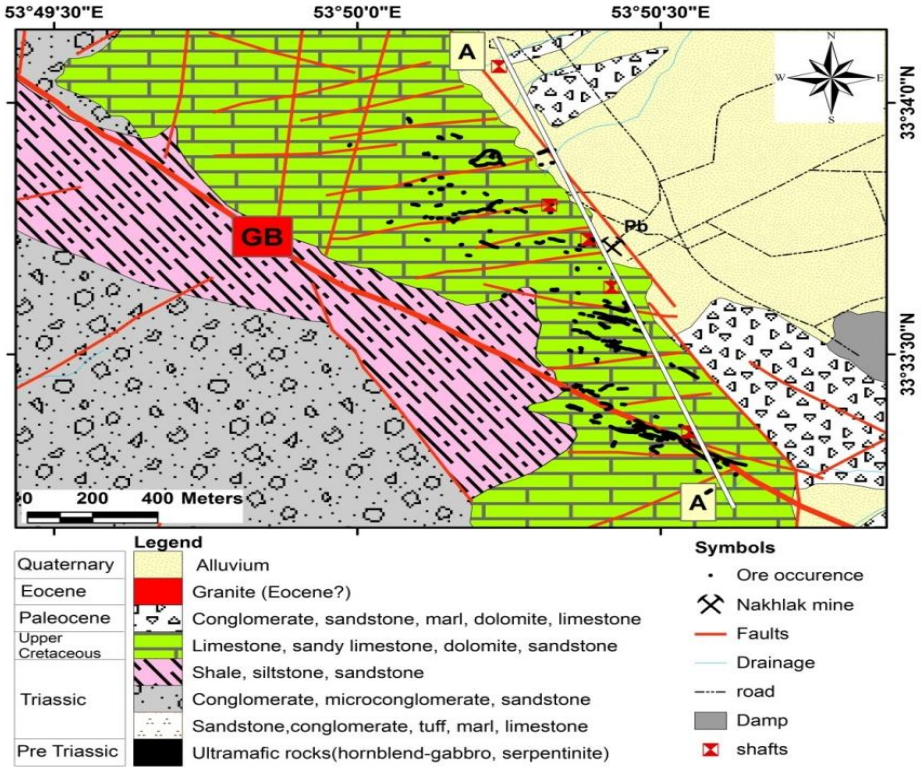
سنگهای کربناتی- آواری کرتاسه بالایی با ضخامت ۲۵۸ متر شامل کنگلومرا، آهک و دولومیت ماسه‌ای، ماسه‌سنگ آهکی، آهک ماسه‌ای-رسی و آهک ریفی می‌باشد (Vaziri et al., 2012). مرز بین سنگ‌های تریاس و کرتاسه بالایی بصورت غیر منطبق (Unconformably) می‌باشد. برخی از محققین این مرز را بصورت دگرشیبی (Davoudzadeh and Seyed emami., 1972; Holzer and Ghasemipour., 1973; Cherepovsky et al., 1982; Rasa, 1987., Balini et al., 2009) و برخی دیگر بصورت راندگی (Alavi et al., 1997; Vaziri., 2005) معرفی نموده‌اند. جوانترین واحد سنگی رسوبی کوه نخلک سنگ‌های پالئوسن با سن دانین-تانتین (Danian-Thanetian) می‌باشد. این واحد با ضخامت حدود ۲۶۰ متر شامل ۶۰ متر کنگلومرای قرمز پایه‌ای و ۲۰۰ متر بالایی شامل تناوبی از ماسه‌سنگ کنگلومرای قرمز رنگ ضخیم لایه، ماسه‌سنگ، مارن سبز، دولومیت و آهک خاکستری رنگ است (Vaziri et al., 2005). سنگ‌های پالئوسن با مرز گسلی روی سنگ‌های کرتاسه بالایی قرار گرفته است. حضور خرده‌سنگ و قطعاتی از آهک کرتاسه بالایی درون کنگلومرای قرمز پایه‌ای پالئوسن و ماسه‌سنگ های کنگلومرایی نشان می‌دهد که یک عدم رسوب‌گذاری در مرز بین واحد کرتاسه و پالئوسن رخ داده و دگرشیبی (Unconformity) ایجاد شده است. در حقیقت مرز گسلی بین این دو واحد سنگی بصورت ثانویه و پس از رسوب‌گذاری ایجاد گردیده است (Vaziri et al., 2012). سنگ‌های آذرین با سن ائوسن (؟)به شکل چند دایک و استوک کوچک در غرب کوه نخلک شامل گرانیت پورفیری، گرانودیوریت پورفیری بوده که به شدت هوازده و دگرسان هستند. این سنگ‌ها در مجاورت سنگ‌های سازند علم و کانی‌سازی آهن بوته علم قرار گرفته‌اند.

بحث

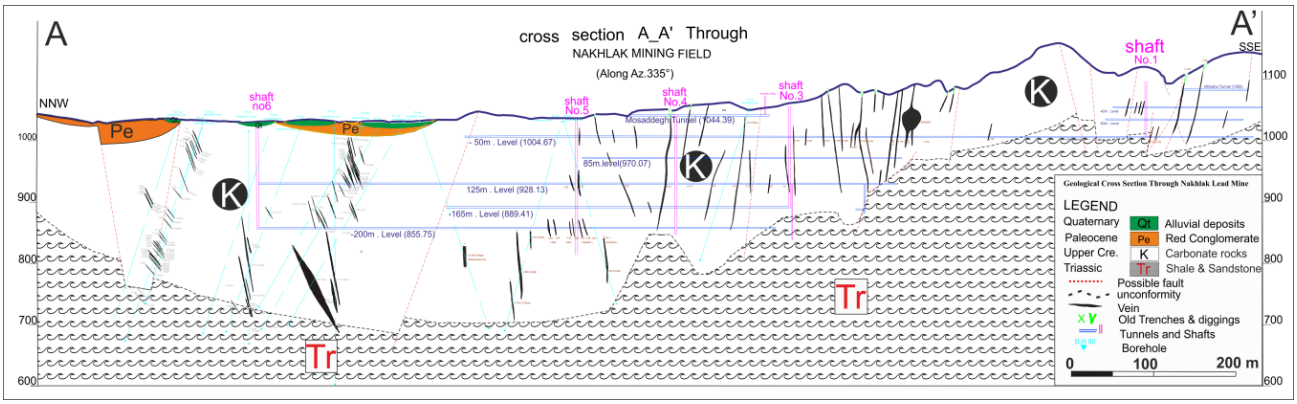
با توجه به بررسی‌های انجام شده عوامل و کنترل‌کننده‌های کانی‌سازی در کوه نخلک را می‌توان در سه دسته اصلی مورد تحلیل و بررسی قرار داد که شامل: الف) عوامل چینه‌شناسی؛ ب) عوامل سنگ‌شناسی و ج) عوامل ساختاری می‌باشد.

عوامل چینه‌شناسی

کانی‌سازی در کوه نخلک بصورت چینه کران (Stratabound) و غیر همزاد (Epigenetic) درون سنگ‌های کربناته کرتاسه بالایی جای گرفته است (جزی و شهاب‌پور، ۱۳۸۹) (شکل ۴ و ۵). در کوه نخلک آهک‌های کرتاسه بالایی به عنوان سنگ میزبان کانی‌سازی با ضخامت ۲۵۸ متر تنها کمتر از ده درصد از کل توالی ستون چینه‌شناسی کوه نخلک را تشکیل داده است. سنگ‌های کربناته به سبب انحلال پذیری و واکنش پذیری بالا، می‌توانند حتی در حالتی که تنها در قسمت کوچکی از ستون چینه‌شناسی منطقه وجود دارند به عنوان یک افق مناسب جهت کانی‌سازی عمل نماید(Evans, 1993). سنگ‌های کرتاسه بالایی بصورت نواری شمالی-جنوبی با طول حدود ۵ کیلومتر و عرض متوسط ۵۰۰ متر در شرق کوه نخلک گسترده شده‌اند. بخش عمده کانی‌سازی تنها در طول حدود ۱/۸ کیلومتر میانی نوار سنگ‌های کرتاسه بالایی جای گرفته است (شکل ۴و ۵).



شکل ۴. پراکندگی نقاط کانی‌سازی که حفاری شدادی هم روی آن صورت گرفته است (GB: گسل قلعه بزرگ)



شکل ۵. مقطع عرضی با امتداد تقریبی شمالی جنوبی مربوط به نحوه قرارگیری ماده معدنی نسبت به سنگ میزبان (Tr: واحد تریاس؛ K: واحد کرتاسه؛ Pe: واحد پالئوسن)

عمده‌ترین محدوده کانی‌سازی شده کربنات‌های کرتاسه بالایی در قسمتی می‌باشد که سنگ میزبان در مجاورت سازند عشین قرار گرفته است (شکل۶). سنگ‌شناسی عمده سازند عشین را سنگ‌های شیلی تشکیل می‌دهند (Alavi, 1997; Balini et al., 2009). واحدهای شیلی و کربنات‌های شیلی نفوذ ناپذیر، در یک توالی چینه‌ای نقش مهمی درکنترل مهاجرت و نقل و انتقال سیالات ایفا می‌نماید (Leach et al., 2005). در (شکل۷) نیمرخ شماتیک از نقطه A تا B، (شکل۶) نشان داده شده است. در این شکل رگه‌های معدنی درون کربنات‌های کرتاسه بالایی قرار گرفته و درون واحدهای شیلی سازند عشین وارد نمی‌شود، علت این مسئله عدم نفوذ سیالات کانه‌دار به درون سازند عشین است. سازند عشین بصورت سدی، مانع اصلی عبور سیالات کانه‌دار بوده و در نتیجه باعث تجمع این سیالات درون درز و شکستگی‌های آهک‌های کرتاسه بالایی شده است. دیگر اهمیت حضور واحد شیلی در کنار کانی سازی ایجاد یک محیط احیایی با تامین H_2S مورد نیاز جهت ته نشست ماده معدنی از سیال بوده (Sverjensky, 1986) که این پدیده نیز احتمالا در کانی سازی کوه نخلک نقش داشته است.

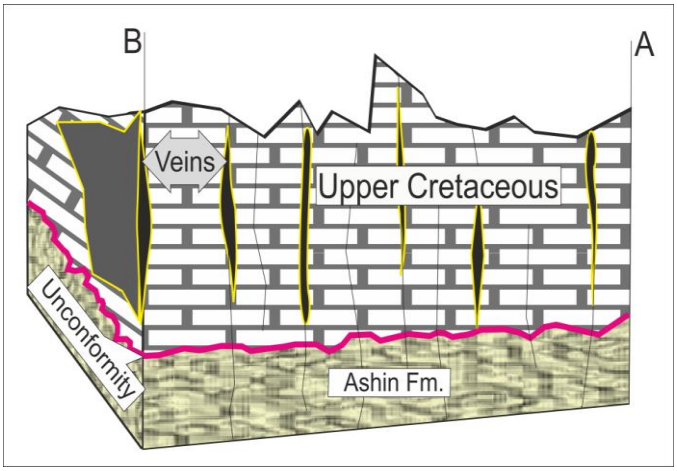
در کوه نخلک مرز بین کربنات‌های کرتاسه بالایی و سنگ‌های پالئوسن به صورت دگرشیبی در نظر گرفته شده است (Vaziri et al., 2012). قرارگیری سنگ‌های کربناته در زیر سطوح دگرشیبی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد؛ چراکه وجود دگرشیبی بدین معناست که این سنگ‌ها در یک مقطع زمانی فرصت قرارگیری در سطح زمین را داشته‌اند و درنتیجه به سبب قرارگیری در سطح، تحت تاثیر انحلال و کارستی شدن قرار گرفته و درون آن فضای خالی مناسبی ایجاد شده است. بیشتر کانسارهای مشهور سرب و روی با سنگ میزبان کربناته به جز در جنوب‌شرق میسوری (SE Missouri) در زیر یک دگرشیبی قرار گرفته‌اند (Leach and Sangster, 1993). در کانسار نخلک کانی‌سازی عمدتا در یک فضای ساختاری منظم قرار گرفته و بدین سبب نقش کارست در ایجاد فضای خالی بسیار کم می‌باشد. تنها نقش پدیده کارستی شدن احتمالا در فاصله زمانی بین ایجاد فضاهای تکتونیکی و رخداد کانی‌سازی بوده است و تنها باعث گسترش و توسعه اندک در فضاهای خالی تکتونیکی شده است.

بیشترین ذخایر سرب و روی شناخته شده ایران در سنگ‌های کرتاسه یافت شده و در بیشتر نقاط ایران مانند زون سنندج-سیرجان (کانسارهای کمربند ملایر-اصفهان)، ایران مرکزی (کانسارهای مهدی آباد، منصور آباد و فرح آباد در منطقه یزد و کانسار نخلک در منطقه انارک)، شناخته شده است (قربانی،۱۳۸۱). تشکیل کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان کربناته در دو طرف خط درز نائین-بافت (همچون کانسار نخلک) مربوط به بسته شدن حوضه نائین-بافت و سبزوار در طول ماستریشتین-پالئوسن می‌باشد (Rajabi et al., 2012). مهمترین دوره تشکیل کانسارهای با سنگ میزبان کربناته دونین-پرمین و کرتاسه-ترشیاری بوده و عمدتا همزمان با وقایع انقباضی در فانروزوئیک در کربنات‌های حاشیه قاره می‌باشند (Leach et al., 2010). این موقعیت تکتونیکی و سن کانی‌سازی منطبق بر این ویژگی‌های کانسار نخلک می‌باشد.

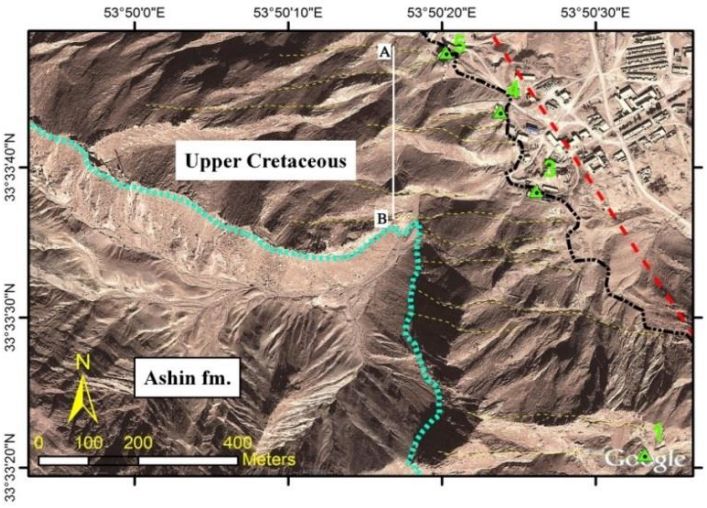
عوامل سنگ‌شناسی

در منطقه نخلک دریای کرتاسه به روی رسوبات تریاس پیشروی نموده و یک سری رسوبات کم عمق و گاهی نزدیک به ریف را بوجود آورده که بخش عمده آن از سنگ‌های کربناتی تشکیل شده است (خسرو تهرانی، ۱۳۶۲). سنگ‌های کرتاسه بالایی در کوه نخلک به طور کلی شامل سنگ آهک، آهک ماسه‌ای، ماسه‌سنگ آهکی و دولستون می‌باشد. ستون چینه‌شناسی کرتاسه بالایی در (شکل ۸) آورده شده است. چند نکته در این ستون چینه‌شناسی به چشم می‌خورد از جمله آنها می‌توان به انتقال از آهک به دولومیت، حضور رخساره ریفی و حضور دولستون اشاره نمود.

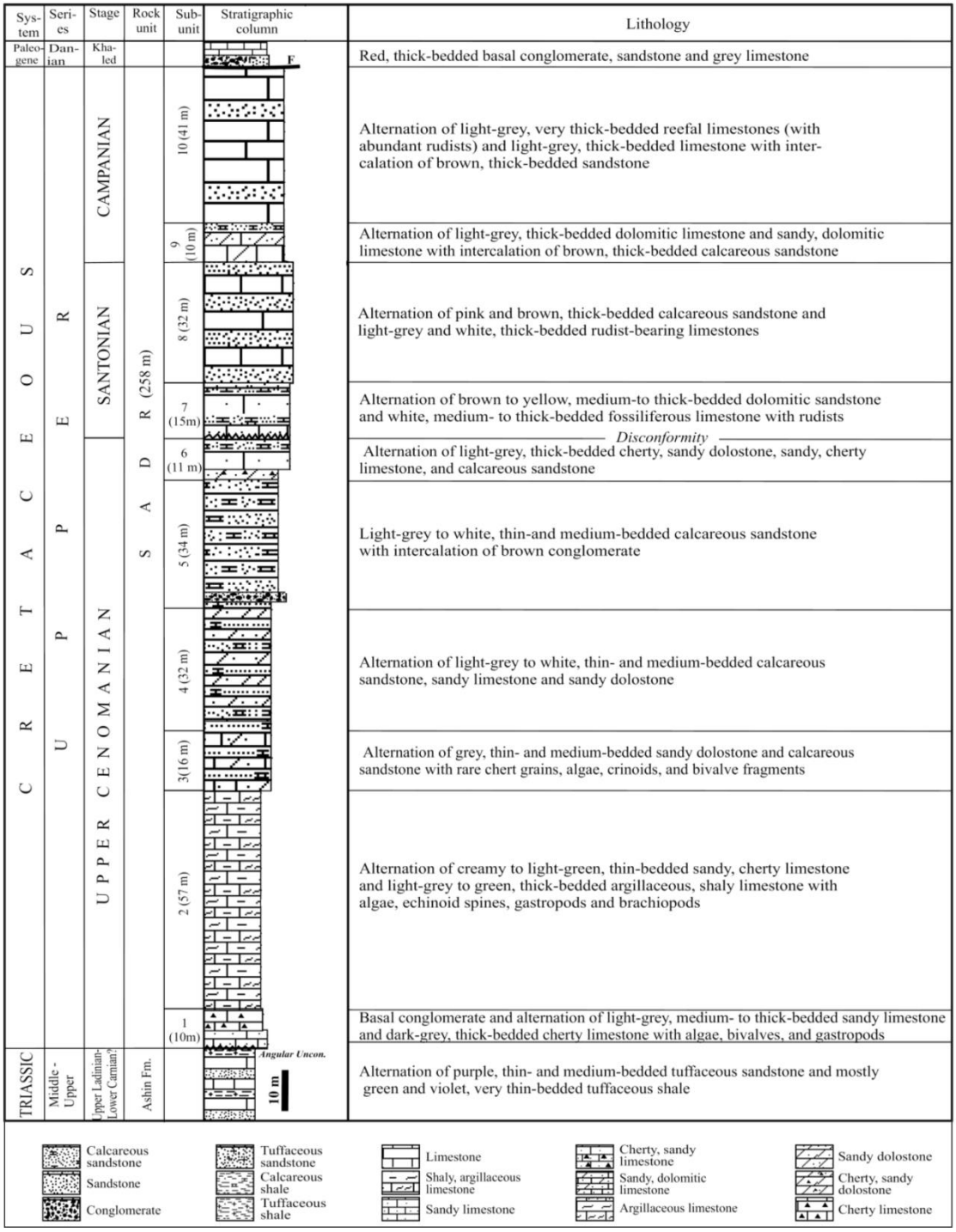
انتقال از آهک به دولومیت باعث تغییر در نفوذپذیری شده که خود باعث ته نشست ماده معدنی می‌گردد. این حالت انتقالی به صورت مکرر در ستون چینه‌شناسی کوه نخلک تکرار شده است. ریف و سد کربناتی به دلیل وجود تخلخل بالا باعث کاهش فشار شده که این خود می‌تواند باعث ته نشست ماده معدنی گردد (Leach et al., 2005). توالی سنگ‌شناسی کرتاسه بالایی کوه نخلک را در برخی قسمت‌های ستون چینه‌شناسی نزدیک به ریف می‌باشد.



شکل ۶ . قرارگیری رگه‌های معدنی موجود در کربنات‌های کرتاسه بالایی در مجاورت سازند شیلی عشین



شکل۷. نیمرخ شماتیک از نقطه A تا B، مربوط به شکل ۶



شکل۸ . ستون چینه‌شناسی کوه نخلک (Vaziri et al., 2012)

(خسرو تهرانی، ۱۳۶۷) با این حال فضای خالی رخساره ریفی حضور کم رنگی در جایگیری ماده معدنی کوه نخلک ایفا نموده و کانی‌سازی عمدتا در شکستگی‌ها تمرکز یافته است. حضور دولستون به عنوان بخشی از سنگ میزبان کانسار نخلک از اهمیت بالایی برخوردار است. سنگ‌های دولومیتی نقشی انکار ناپذیر در کانی‌سازی غالب کانسارها بازی کرده و فرارتر از یک سنگ خنثی در جایگیری ماده معدنی عمل می‌کنند. در برخی از موارد این سنگ‌ها تنها بصورت مجرایی پر منفذ اجازه عبور و اختلاط محلول‌های کانه‌دار را می‌دهد ولی در بیشتر موارد تشکیل دولومیت‌های تدفینی مراحل آخر و یا دولومیت‌های گرمابی رابطه تنگاتنگی با سیالات حوضه‌ای دارند که مسئول کانی‌سازی نیز هستند (Warren, 2000).

کانی دولومیت یکی از اساسی‌ترین کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌های کرتاسه بالایی کوه نخلک می‌باشد. این کانی به اشکال مختلفی همچون جانشینی کربنات‌های اولیه، پرکننده فضای خالی، سیمان سنگ میزبان و حتی همراه با ماده‌معدنی درون رگه‌ها قابل مشاهده هستند. به طور کلی این دولومیت‌ها با دو منشا اولیه و ثانویه (در اثر کانی‌سازی) ایجاد شده‌اند. بر اساس خصوصیاتی همچون شکل، اندازه، ادخال و منطقه‌بندی دولومیت‌های سنگ میزبان کانسار نخلک به چهار نوع تقسیم شده اند(جدول۱) (جزی و شهاب‌پور، ۱۳۸۹). اغلب کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی در دولستون مرتبط با آهک جایگیر شده‌اند و کانسارهای با میزبان دولستون معمولا بزرگتر و از نظر محتوای فلزات Pb، Zn و Ag دارای مقادیر بالاتری هستند. برتری دولستون‌ها نسبت به سنگ آهک در کانی‌سازی می‌تواند در ارتباط با قابلیت نقل و انتقال بالاتر جریان سیال کانه‌دار در این سنگ‌ها باشد (Leach et al., 2005).

دولومیت‌های درون سنگ‌های کرتاسه بالایی نخلک به صورت ایجاد کننده فضای خالی جهت کانی‌سازی و برخی به صورت پرکننده فضای خالی عمل نموده و لذا این کانی‌ها از مرحله قبل تا انتهای کانی‌سازی حضور فعالی داشته‌اند (شکل ۹الف). تخلخل بین بلوری، نتیجه جانشینی دولومیت به جای کلسیت است، که بدلیل چگال‌تر بودن دولومیت نسبت به کلسیت، تخلخل سنگ در حدود ۱۲/۵ درصد افزایش می‌یابد (رحیم پور بناب، ۱۳۸۴). دولومیت‌های دانه شکری نوع دوم به صورت خود شکل و با اندازه‌های مساوی در حد چند ده میکرون با ماده‌معدنی (کانی گالن) همراه بوده و در برخی نقاط فضای بین بلورها و نیز اطراف بلورهای دولومیت بوسیله گالن پر شده که نشان‌دهنده تقدم این دولومیت‌ها نسبت به کانی‌سازی است (شکل۹ب). همچنین کانی گالن به صورت خود شکل تا نیمه خود شکل با بافت انتشاری درون سنگ میزبان در فاصله چند ده سانتی متر پراکنده شده است(شکل ۹ج).

دولومیت‌های دانه شکری بصورت همزمان با کانی‌سازی همراه با کانی باریت بصورت همرشدی با یکدیگر مشاهده می‌شود (شکل ۹د). در (شکل ۹ه) کانی‌سازی بصورت رگچه‌ای باریک درون شکستگی را با بافت قشری پر نموده است و علاوه بر آن فضای خالی بین بلوری را نیز پر نموده است. دولومیت‌های زین اسبی (Saddle dolomite) همراه با فازهای گرمابی و در دمای ۶۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد ته نشین می‌شود و فرایند زیر را می‌توان برای تشکیل آن پیشنهاد نمود (Hill, 1995) :

$$H_2S + CO_2 + MeCl^+ + Mg^{++} + 2CaCO_3 + H_2O \rightarrow MeS + Ca^{++} + CaMg(CO_3)_2 + HCO_3^- + Cl^- + 3H^+$$

Me در رابطه بالا می‌تواند آهن، سرب و یا روی باشد که به ترتیب منجر به تشکیل کانی‌های پیریت، گالن و اسفالریت می‌شود. اغلب دولستون‌ها در محدوده کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی تاریخچه پیچیده‌ای دارند و می‌توانند قبل، همزمان و بعد از کانی‌سازی رخ دهد. یکی از مسائل مبهم در این مورد این است که آیا دولومیتی شدن باعث قرارگیری کانی‌سازی شده و یا اینکه دولومیتی شدن خود حاصل جایگیری ماده معدنی بوده است؟ در کانسار نخلک می‌توان ارتباط کانی‌سازی و دولومیتی شدن را به صورت بازخوردی (Feedback) مشاهده نمود؛ بدین صورت که سیال کانی‌ساز و کانی‌سازی باعث تشکیل کانی دلومیت شده و خود دولومیتی شدن در ایجاد فضای خالی و در نتیجه کانی‌سازی بیشتر موثر بوده است.

$$H_2S + CO_2 + MeCl^+ + Mg^{++} + 2CaCO_3 + H_2O \rightarrow MeS + Ca^{++} + CaMg(CO_3)_2 + HCO_3^- + Cl^- + 3H^+$$

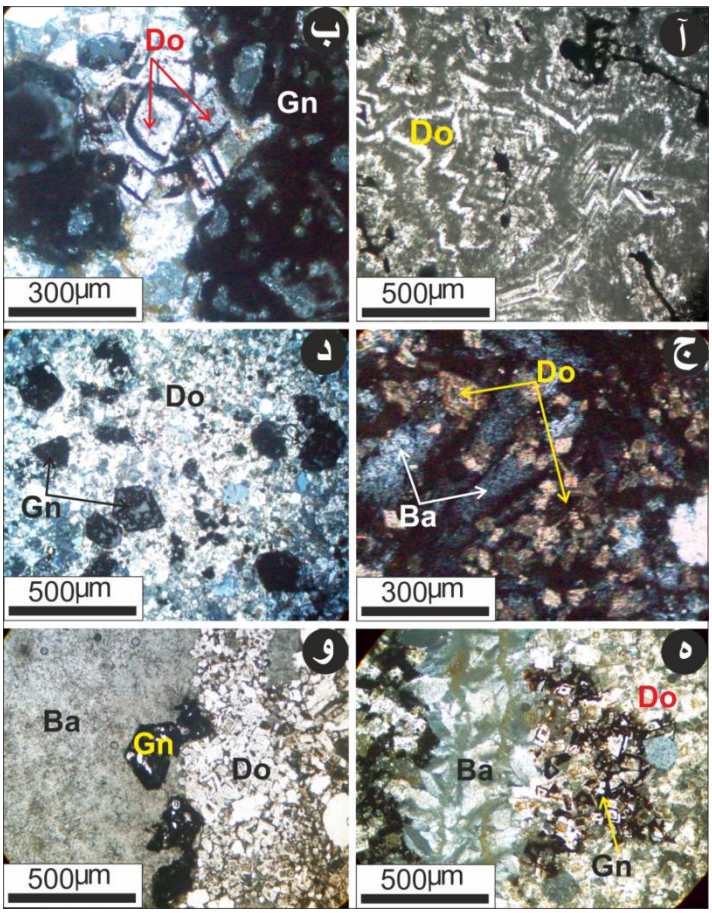
Me در رابطه بالا می‌تواند آهن، سرب و یا روی باشد که به ترتیب منجر به تشکیل کانی‌های پیریت، گالن و اسفالریت می‌شود. اغلب دولستون‌ها در محدوده کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی تاریخچه پیچیده‌ای دارند و می‌توانند قبل، همزمان و بعد از کانی‌سازی رخ دهد. یکی از مسائل مبهم در این مورد این است که آیا دولومیتی شدن باعث قرارگیری کانی‌سازی شده و یا اینکه دولومیتی شدن خود حاصل جایگیری ماده معدنی بوده است؟ در کانسار نخلک می‌توان ارتباط کانی‌سازی و دولومیتی شدن را به صورت بازخوردی (Feedback) مشاهده نمود؛ بدین صورت که سیال کانی‌ساز و کانی‌سازی باعث تشکیل کانی دلومیت شده و خود دولومیتی شدن در ایجاد فضای خالی و در نتیجه کانی‌سازی بیشتر موثر بوده است.

گسترش دولومیت‌های نوع دانه شکری همراه با ماده‌معدنی و محدود به گسل‌ها و شکستگی‌ها بوده و با فاصله گرفتن به صورت تدریجی کاهش می‌یابد (شکل۹و). در برخی از کانسارهای نوع MVT دولومیت‌های درشت دانه مرتبط با کانی سازی توسط گسل‌ها کنترل می‌شود. رابطه بین گسل‌ها و پراکندگی دولومیت‌ها پیشنهاد می‌کند که سیالات داغ حوضه‌ای از سیستم عمقی درون این شکستگی‌های با نفوذپذیری بالا رخنه کرده است. در برخی مواقع خود این گسل‌ها نیز دارای کانی‌سازی شده‌اند. ورود سیالات به مناطق نفوذپذیر باعث دلومیتی‌شدن و سپس کانی‌سازی سولفیدی شده است (Warren, 2000).

علاوه بر شکستگی‌های ساختاری فرایندهای شیمیایی نیز در ایجاد فضای مناسب کانی‌سازی در ته نشست کانسار نقش دارند که از جمله این فرایندها می‌توان به دولومیتی‌شدن، سیلیسی‌شدن و تبلور مجدد اشاره کرد (Park and Macdiaramid,1972). دلومیتی‌شدن با افزایش نفوذپذیری همانند شکستگی‌ها در ایجاد محیطی کم فشار موثر بوده که می‌تواند به عنوان محلی جهت تجمع سیالات کانه‌دار و ته نشست ماده معدنی عمل نماید.

جدول۱. خلاصه‌ای از خصوصیات دولومیت‌های کوه نخلک و نقش آنها در کانی‌سازی (جزی و شهاب‌پور، ۱۳۸۹)

نقش در کانی سازی	زمان بندی	خصوصیات ظاهری	نوع دولومیت
پتروگرافی مناسب	قبل از کانی سازی در مرحله دیاژنزی	ریز بلوروعمدتا بی شکل	اول
ایجاد فضای خالی	قبل از کانی سازی تا مراحل اولیه	دانه شکری، مرکز بلور تیره و حاشیه روشن	دوم
ایجاد فضای خالی	در حین کانی سازی تا مراحل آخر کانی سازی	خود شکل و درشت تا ۲ میلیمتر، مرکز بلور روشن و حاشیه تیره	سوم
همراهی با کانی سازی	حین کانی سازی تا مراحل آخر کانی سازی	درشت و دارای سطوح خمیده، نوع زین اسبی	چهارم



شکل ۹. الف) پر شدن فضای خالی توسط دولومیت ثانویه؛ ب) پر شدن فضای خالی بین بلوری دولومیت توسط گالن؛ ج) همراهی کانی‌سازی دلومیت و باریت؛ د) بافت انتشاری ماده معدنی درون دلومیت‌ها؛ ه) رگچه کانی سازی با پر کننده فضای خالی؛ و) رگه با حاشیه دلومیتی شده (Gn: گالن، Ba: باریت، Do: دولومیت).

عوامل ساختاری

اصلی‌ترین شکل قرارگیری ماده‌معدنی کانسار نخلک درون ساختمان‌های تکتونیکی شامل گسل‌ها و درز-شکاف‌ها می‌باشد. در بسیاری از کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان کربناته، مهمترین کنترل‌کننده گسترش فضایی کانی‌سازی، گسل‌ها و شکستگی‌ها هستند (Turner, 2011). تحلیل هر یک از این ساختارها و ارتباط آن با کانی‌سازی در ادامه بررسی شده و شکل قراگیری ماده‌معدنی درون آن شرح داده خواهد شد. از اطلاعات حاصل در نهایت مدل ساختاری و نحوه ایجاد فضای خالی ساختاری کوه نخلک ارائه خواهد شد.

گسل‌ها

با توجه به اینکه بسیاری از کانی‌سازی‌های فلزات پایه، در پهنه های گسلی همراه با دگر شکلی شکننده متمرکز می‌باشند، بررسی عناصر ساختاری یکی از موارد مهم جهت پی‌جویی و اکتشاف مواد معدنی است (Nissa, 2012). گسل‌ها مهمترین مولفه ساختاری کوه نخلک را تشکیل می‌دهند که هم به شکل جای‌دهنده ماده‌معدنی و هم بصورت محدودکننده کانی‌سازی عمل می‌کنند. با توجه به امتداد، محل قرارگیری و نوع ارتباط با کانی‌سازی، این گسل‌ها قابل تقسیم در سه گروه می‌باشند:

گروه اول

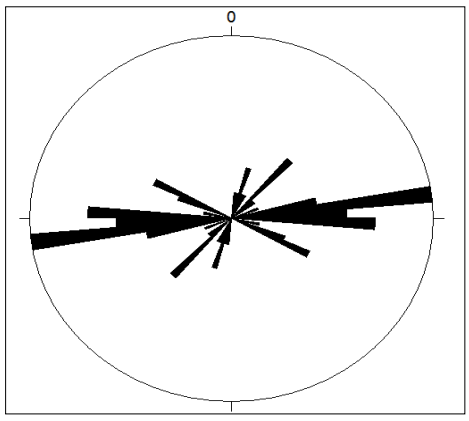
گسل‌های با امتداد غرب-شمال‌غربی و شمال غربی که عمدتا درون سنگ‌های تریاس جای گرفته و احتمالا در ارتباط با کوهزایی سیمرین می‌باشند (Cherepovsky et al., 1982). مهمترین گسل این گروه گسل قلعه بزرگ می‌باشد (شکل ۴). این گسل با طول حدود ۶ کیلومتر دارای شیب زیاد (۷۰ تا ۹۰ درجه) به سمت شمال‌شرق با مولفه حرکتی امتدادلغز چپ گرد می‌باشد. این گسل علاوه بر قطع نمودن سنگ‌های تریاس به درون سنگ‌های کرتاسه و پالئوسن نیز وارد شده است. مقدار جابه‌جایی این گسل در سنگ‌های تریاس به سبب مرز تند و بالا آمدن سازند باقرق صدها متر می باشد، ولی در سنگ‌های کرتاسه این مقدار جابه‌جایی به مراتب کمتر است. این تفاوت در جابه‌جایی به دلیل وجود حداقل دو زمان در فعالیت این گسل بوده که اولی در زمان بعد از تریاس و قبل از کرتاسه بالایی و دومی در زمان بعد از پالئوسن است که این جابه جایی مسئول اصلی در ایجاد فضای خالی می‌باشد. بیشترین کانی‌سازی در سمت شمالی این گسل و در سمت کمر بالای آن رخ داده است. در اطراف این گسل شدت کانی‌سازی بیشتر بوده و با حرکت به سمت شمال با وجود فضای خالی مناسب، از شدت کانی‌سازی کاسته شده است. با توجه با این ویژگی به احتمال زیاد گسل قلعه بزرگ یک گسل عمیق بوده و معبر اصلی سیالات کانه‌دار به داخل سنگ‌های کرتاسه بالایی بوده است.

گروه دوم

گسل‌های تقریبا شمالی-جنوبی و شمال-شمال‌غربی که مهمترین گسل آن گسل نخلک می‌باشد. گسل نخلک با طول حدود ۴ کیلومتر و شیب زیاد ۷۵ تا ۸۵ رو به شرق در جنوب معدن مرز بین واحدهای کرتاسه بالایی و پالئوسن را تشکیل می‌دهد (شکل۳). در واقع این گسل مرز دگرشیب بین دو واحد کرتاسه بالایی و پالئوسن را دچار حرکت کرده و بصورت گسله در آورده است. به احتمال زیاد گسل نخلک در تقاطع با گسل قلعه بزرگ جابه‌جا شده و بدین سبب در قسمت شمال معدن ادامه گسل نخلک بصورت واضح مشاهده نمی‌شود. مولفه حرکتی این گسل معکوس و مقدار جابه‌جایی عمودی آن در حدود ۲۰۰ متر و زون خرد شده(Crush zone) چند متری دارد. اهمیت این گسل در کانی‌سازی نقش محدودکنندگی آن بوده که در واقع این گسل حد شرقی کانسار نخلک را تشکیل می‌دهد.

گروه سوم

این گسل‌ها بیشتر در سنگ‌های کرتاسه بالایی قابل مشاهده هستند. نمودار گل سرخی این گسل ها در (شکل۱۰ الف)و نمونه ای از آن در (شکل۱۰ب) آورده شده است. آزیموت این گسل ها عمدتا بین ۸۰ تا ۹۵ درجه با مولفه حرکتی نرمال و با شیب زیاد نزدیک به عمود به سمت شمال و جنوب است. این گسل‌ها از نظر کانی‌سازی به عنوان جای دهنده بخشی از ماده معدنی حائز اهمیت بالایی هستند. سطح این گسل‌ها دارای تحدب و تعقر بوده که حرکت گسل باعث تشکیل فضاهایی عدسی شکل شده که توسط ماده معدنی پر شده‌اند.



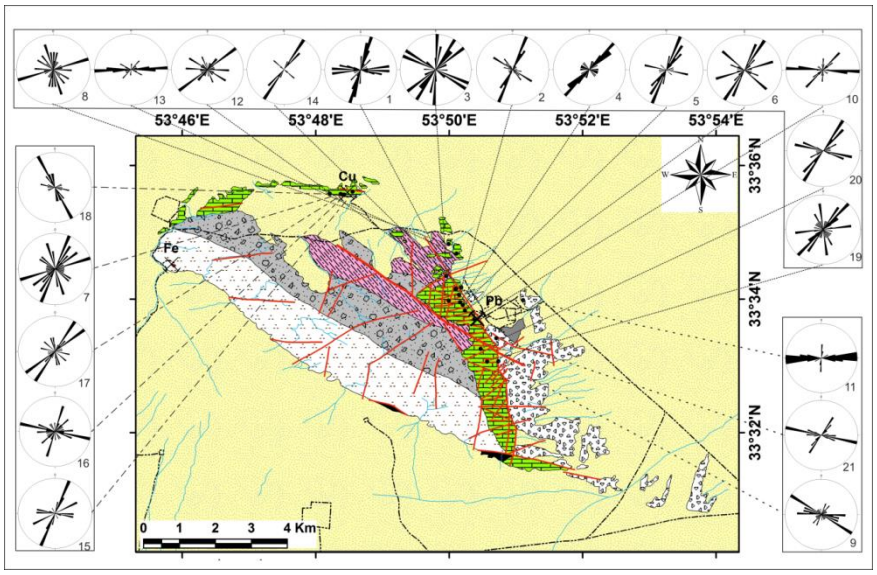
شکل ۱۰ . الف) امتداد گسل های موجود در کربناتهای کرتاسه بالایی به شکل نمودار گل سرخی؛ ب) گسل گروه سوم (گسل نرمال موجود در کربناتهای کرتاسه بالایی با امتداد شرقی-غربی و شیب به سمت غرب).

درزه‌ها

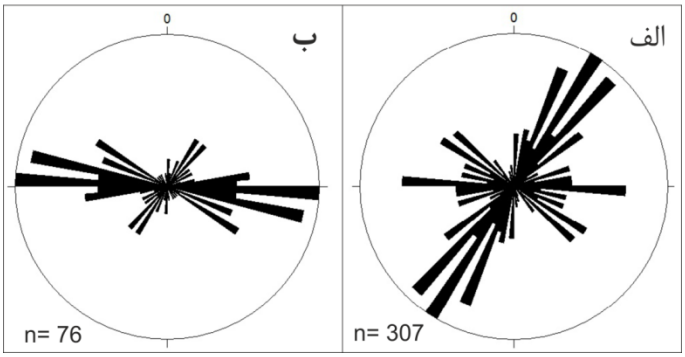
سنگ‌های کرتاسه بالایی در سطح زمین به شدت دچار درز و شکستگی شده‌اند. درزه‌های کششی و مزدوج از انواع مهم این درزه‌ها بوده که در محدوده معدنی معمولا دارای پرشدگی از ماده معدنی هستند. نمودارهای گل سرخی مربوط به ایستگاه‌های برداشت درزه در سنگ‌های کرتاسه بالایی و پالئوسن در شکل (**۱۱**) آورده شده است؛ همچنین نمودار گل سرخی کلیه درزه‌های کرتاسه و پالئوسن در (شکل‌های۱۲ الف و ب) مشاهده می‌شود. در نمودار درزه‌های کلی کرتاسه بالایی و پالئوسن دو دسته درزه با آزیموت ۲۰ تا ۵۰ و ۹۰ تا ۱۱۰ وجود دارد. امتداد درزه‌های کرتاسه و پالئوسن شباهت زیادی به هم داشته و در نتیجه منشا اعمال نیروهای تکتونیکی در هر دو آنها یکسان بوده است.

رگه‌ها

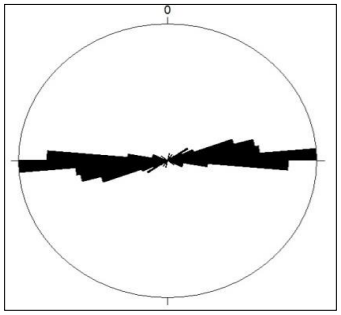
رگه‌های معدنی خود می‌تواند بصورت ساختارهای صفحه‌ای در نظر گرفته شود و در نتیجه امتداد و شیب آنها قابل اندازه‌گیری می‌باشد. در کانسارنخلک بیش از ۵۰ رگه معدنی کوچک و بزرگ شناسایی شده که ضخامتی از چند سانتیمتر تا چند متر داشته که طول آنها به ۴۰۰ متر نیز می‌رسد. کانی‌شناسی رگه‌های معدنی ساده بوده و عمدتا شامل گالن و باریت بوده که در صورت هوازدگی کانی سروزیت جایگزین گالن شده است. نمودار گل سرخی رگه‌های کانسار نخلک در (شکل۱۳) رسم شده است. امتداد این رگه‌ها تقریبا شرقی-غربی بوده و آزیموت آن بین ۸۰ تا ۹۵ درجه است. این رگه‌ها دارای شیب زیادی از ۶۵ تا ۹۰ درجه هستند که هم به سمت شمال و هم جنوب شیب دارند. برای تشکیل رگه‌هایی با امتداد تقریبا موازی و شیب زیاد نیروهای کششی عمود بر امتداد رگه‌ها لازم است (کریم پور و سعادت، ۱۳۸۱). بطور کلی در کانسار نخلک وسعت کانسارسازی زیاد، ضخامت رگه‌ها کم و عمق کانسارسازی از سطح تا حداکثر عمق ۴۰۰ متری توسط گمانه‌های اکتشافی به اثبات رسیده است (Cherepovsky et al., 1982) (شکل ۱۴).



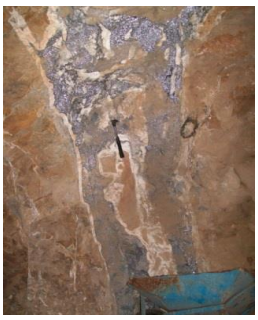
شکل۱۱ . دیاگرام گل سرخی ایستگاهای مختلف برداشت درزه (ایستگاه‌های ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۷ و ۱۸ درون سنگهای کرتاسه بالایی کانسار باقروق؛ ایستگاه‌های ۸، ۱۳، ۱۲، ۱۴، ۱، ۳، ۲، ۴، ۵، ۶، ۱۰، ۲۰ و ۱۹ درون سنگ‌های کرتاسه بالایی کانسار نخلک؛ ایستگاه‌های ۱۱، ۲۱ و ۹ درون سنگ‌های پالئوسن)



شکل ۱۲ . الف) دیاگرام گل سرخی کلیه درزه‌های موجود در واحد کرتاسه بالایی؛ ب) دیاگرام گل سرخی کلیه درزه‌های واحد پالئوسن



شکل ۱۳. دیاگرام گل سرخی تمامی رگه‌های کانسار نخلک



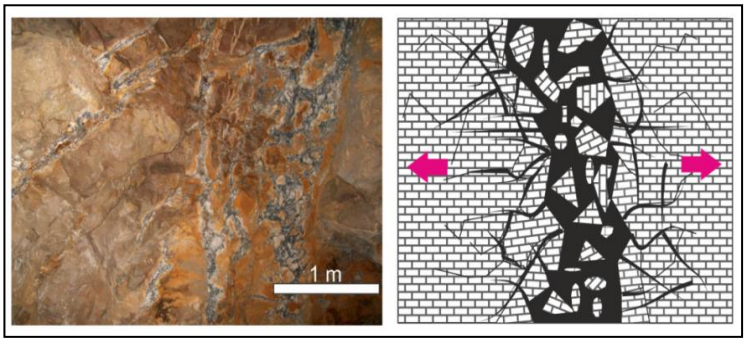
شکل۱۴. عکس نمونه از رگه‌های کانی سازی

نحوه قرارگیری ماده معدنی از نظر ساختاری

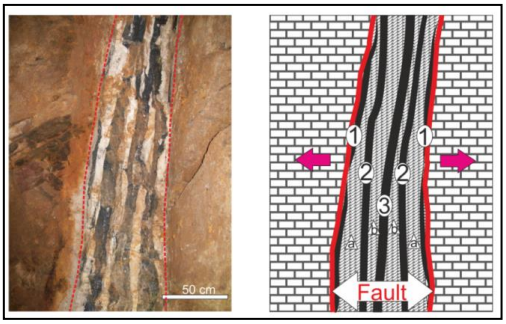
ماده‌معدنی درون فضاهای خالی حاصل از شکستگی‌های کششی و گسل‌های نرمال با ضخامت چند سانتیمتری تا چند متری مشاهده می‌شود. به طور کلی ماده‌معدنی به دو شکل اصلی درون رگه‌ها حضور دارد:
۱) بافت برشی و ۲) بافت قشری.

۱) بافت برشی: برش‌ها از جنس سنگ دیواره هستند که به دلیل زاویه‌دار بودن قطعات برش، قرارگیری درون ساختارهای تکتونیکی و نیز تدریجی بودن شکستگی از سنگ دیواره فاقد شکستگی به درون رگه، می‌توان برشها را از نوع برش‌های تکتونیکی قلمداد کرد (شکل ۱۵). اهمیت برش‌های تکتونیکی از نظر کانی‌سازی وجود تخلخل و نفوذ پذیری بالا می‌باشد که مکان مناسبی جهت انتقال سیالات و نهشت ماده‌معدنی است. برش‌های حاصل از خرد شدن سنگ‌ها را بر اساس جدایش قطعات برش از یکدیگر، مقدار چرخش و سائیدگی قطعات برش به انواع مختلفی تقسیم شده‌اند. بافت‌های برشی مشاهده شده در کانسار نخلک شامل بافت برش خردشده (Crackle breccia)، بافت برش موزائیکی (Mosaic breccia)، بافت برش رابل (Rubble breccia) و برش سائیده شده (Milled breccia)، می‌باشد (جزی و شهاب‌پور، ۱۳۸۹)؛

۲) بافت قشری: در این بافت از سمت دیواره به سمت مرکز رگه کانی‌ها با حالت قرینه قرار گرفته‌اند (شکل۱۶). این تغییر در کانی‌شناسی و ته‌نشست ماده‌معدنی به دلیل تغییرات فیزیکوشیمیایی در هنگام رسوب‌گذاری بوده که بصورت بازخوردی (Feedback) عمل نموده‌اند (Shahabpour, 2010). تکامل تدریجی یک شکاف طی دگرشکلی پیش‌رونده (Progressive deformation) در یک سیستم کششی فعال، بدین صورت است که جهت قدیمی‌ترین شکاف‌های ایجاد شده بر جهت واتنش طولی بیشینه عمود است (Ramsay and Huber., 1983). به طورکلی، شکستگی‌ها از پر کاربردترین نشانه‌های سوی برش و تعیین سوی برش می‌باشد. درزه‌ها عمود بر محور تنش σ_3 و به موازات صفحه درزه تنش‌های σ_2 و σ_1 تشکیل می‌شوند. در صورتی که درز و شکاف بوسیله کانی‌های فیبری از جمله کوارتز، کلسیت و آراگونیت پر شده باشند، جهت بازشدگی آن‌ها با استفاده از جهت‌گیری فیبرها قابل تشخیص است (Belayneh and Cosgrove, 2010). بین بافت‌ها و ساختمان‌ها ارتباط وجود دارد؛ بطوریکه بافت‌های برشی اغلب درون شکستگی‌ها و بافت‌های قشری در فضای خالی گسل‌ها که فاقد برش بود اند تشکیل شده‌اند.



شکل ۱۵. نمایی از ماده‌معدنی با بافت برشی. از سمت سنگ دیواره به سمت مرکز رگه شامل سنگ دیواره والد، برش خرد شده (Crackle breccia) و برش سائیده شده (Milled breccia) است.



شکل ۱۶. بافت قشری درون فضای خالی گسل. در این بافت از سمت خارج به داخل رگه جوان می‌شود. جهت کشش عمود بر رگه‌ها بوده و کانی‌های فیبری باریت در این بافت موازی با جهت بازشدگی می‌باشد.

در برخی از رگه‌ها بافت‌هایی مشاهده می‌گردد که ناشی از عملکرد فشار سیال بوده و حرکت محدود سنگ دیواره را در حین کانی‌سازی موجب می‌شود. از جمله این بافت‌ها تجمعات برشی (Breccia aggregate) و بازشدگی مجدد رگه می‌باشد (شکل‌های۱۷و۱۸). در بافت تجمعات برشی، قطعات برش در واقع خود ماده‌معدنی هستند. در این بافت ماده‌معدنی ته نشست شده در بافت قشری بر اثر عملکرد فشار سیالات خرد شده و به صورت قطعات برش، تجمع یافته و در مرحله بعدی توسط ماده‌معدنی مجددا سیمان شده‌اند. این بافت می‌تواند به عنوان شاهدی مبنی بر چند مرحله‌ای بودن کانی سازی در نظر گرفته شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که رگه‌های کانسار نخلک تقریبا از نظر کانی‌شناسی یکسان بوده و همدیگر را قطع نکرده‌اند و به احتمال زیاد همگی طی یک مرحله جایگیر شده و حرکات تکتونیکی در کوه نخلک پس از کانی‌سازی رخ نداده و یا ناچیز بوده است.

مدل ساختاری کوه نخلک

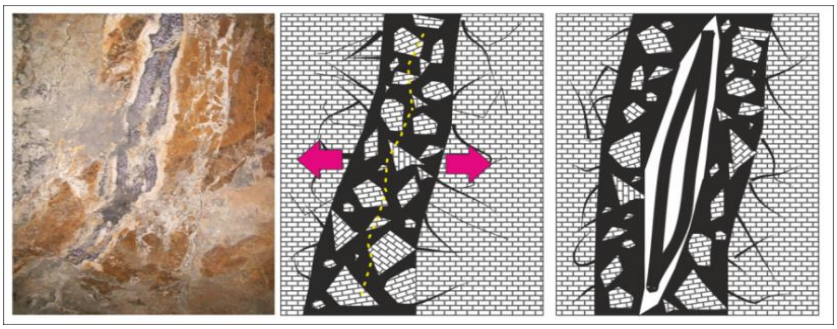
جریان یک سیال کانه‌دار ترجیحا باید متوقف شود تا مواد حل شده آن بتواند در بخش‌های مناسبی از پوسته زمین که پتانسیل کانساری دارد، ته نشست نماید (Robb, 2005). دگرشکلی‌ها که حرکت سیال را در امتداد سیستم‌های گسل اصلی در پوسته زمین کنترل می‌کند، اهمیت اساسی در تشکیل کانسارهای گرمابی در گستره‌ای از عمق‌های پوسته‌ای دارد. این مطلب توسط این حقیقت تایید می‌شود که برخی از کانسارهای گرمابی در داخل ساختارهای گسسته قرار گرفته‌اند، همچنین شرکت‌های اکتشافی مکررا خصوصیات ساختاری محدوده هدف را در تحقیقاتشان برای اکتشاف کانسارها در نظر می‌گیرند (Odeling, 1997; Cox et al., 2001).

برای ایجاد شکستگی‌ها سه مدل ارائه شده است که عبارتند از

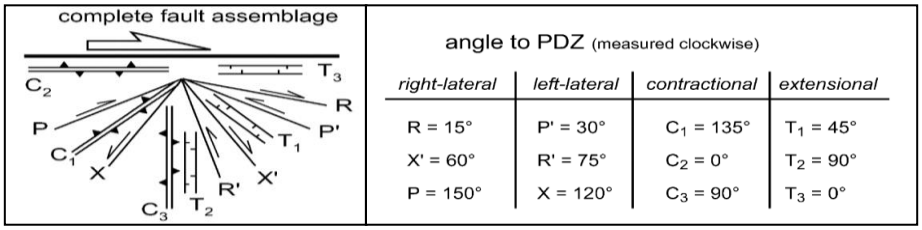
نوع I : بازشدگی (Opening)؛ نوع II: لغزشی (Sliding)؛ نوع III: قیچی یا برشی (Scissors) (Atkinson, 1987). رگه‌های معدنی جایگیر شده در شکستگی‌های کانسار نخلک با توجه به ماهیت کششی و شیب زیاد از نوع I می‌باشد. شکستگی‌ها را می‌توان بر اساس زاویه‌ای که با پهنه جابه‌جایی اصلی می‌سازند به انواع مختلفی تقسیم نمود که هرکدام دارای عملکرد متفاوتی هستند (Storti et al., 2006) (شکل ۱۹).

گسل شمال‌شرق-جنوب‌غربی قلعه بزرگ با طول حدود ۶ کیلومتر دارای شیب زیاد (۷۰ تا۹۰ درجه) به سمت شمال‌شرق با مولفه حرکتی امتدادلغز چپ‌گرد و با آزیموت ۳۱۰ درجه، علاوه بر قطع نمودن سنگ‌های تریاس به درون سنگ‌های کرتاسه و پالئوسن نیز وارد شده است. به سبب مقدار جابه‌جایی بالای این گسل و نیز ارتباط تنگاتنگ با کانی‌سازی این گسل به عنوان پهنه اصلی جابه جایی در کوه نخلک که منجر به ایجاد فضای خالی در کربنات‌های کرتاسه بالایی شده در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که در تقسیم‌بندی شکستگی‌ها که در الگوی (شکل۱۹) ارائه گردید، گسل اصلی عملکرد راستگرد داشته، حال آنکه گسل قلعه بزرگ چپ گرد بوده و در نتیجه شکستگی‌ها نیز با توجه به این عملکرد دچار تغییراتی می‌شود؛ بدین‌صورت که شکستگی‌های با عملکرد راستگرد به صورت چپگرد تغییر عملکرد داشته‌اند و برعکس. گسل‌های موجود در سنگ‌های کرتاسه بالایی نسبت به روند اصلی حرکتی زوایای مختلفی دارند که در (شکل ۲۰ a) آورده شده است. با توجه به زاویه‌ایی که گسل‌ها با پهنه جابه جایی اصلی می‌سازند، بیشترین تعداد گسل‌ها از نوع T1 می‌باشد که به دلیل ایجاد فضای خالی توسط ماده‌معدنی نیز پر شده‌اند. به طور کلی این گسل‌ها از نوع گسل های نرمال و دارای عملکردهای کششی می‌باشند. تحلیل درزه‌های موجود در سنگ‌های کرتاسه بالایی نشان می‌دهد که این درزه‌ها نسبت به پهنه جابه‌جایی اصلی دارای عملکردهای کششی (T1, T2, T3) و چپ‌گرد (P′, R′, X) و راست‌گرد (P, R) می‌باشد (شکل۲۰ b). نقش درزه‌های کششی از دیگر شکستگی‌ها بیشتر بوده و با اختلاف شکستگی‌های ریدل و آنتی ریدل قرار می‌گیرند. رگه‌های معدنی به عنوان هدف اصلی در این پژوهش، نسبت به پهنه جابه‌جایی اصلی دارای اختلاف زاویه ۴۵±۵ درجه می‌باشد (شکل۲۰ c).

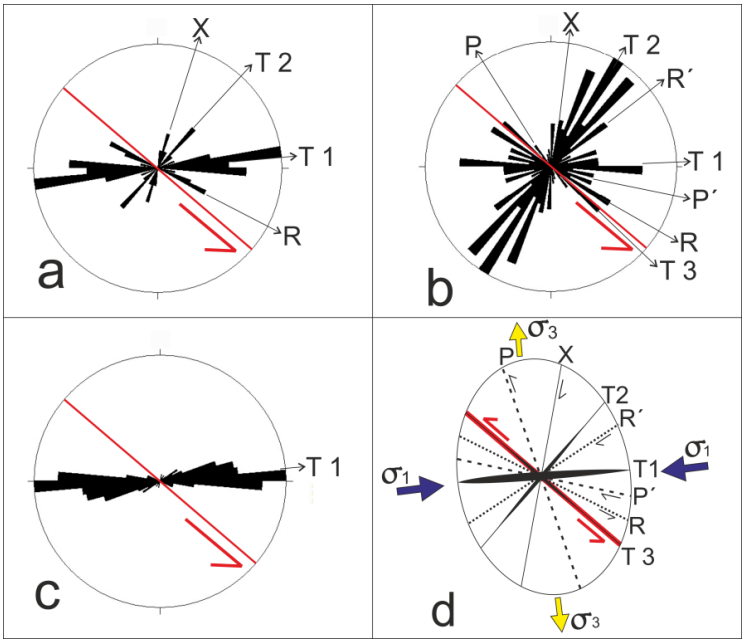
شکل ۱۷. بافت تجمعات برشی، قرارگیری قطعات بافت اولیه قشری برشی شده در میان رگه و سیمان شدگی توسط گالن نسل بعدی



شکل ۱۸. بافت بازشدگی مجدد. در این بافت ابتدا فضای خالی درون شکستگی با بافت برشی ماده‌معدنی پر شده است و در مرحله بعدی این رگه مجددا باز شده و در فضای خالی ثانویه کانی‌سازی نسل بعد با بافت قشری ایجاد شده است.



شکل۱۹. جهت‌گیری شکستگی نسبت به پهنه جابه‌جایی اصلی و زاویه‌ای که شکستگی‌ها می‌سازند (Storti et al., 2006)

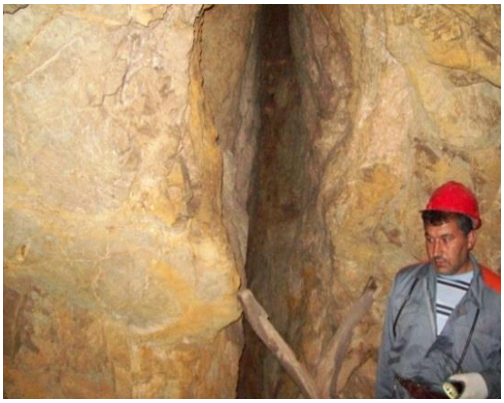


شکل ۲۰. a) طبقه بندی گسل‌های کوه نخلک نسبت به پهنه جابه‌جایی اصلی ؛ b) طبقه بندی درزه‌های کربنات‌های کرتاسه بالایی نسبت به پهنه جابه‌جایی اصلی ؛ c) طبقه بندی رگه‌های معدنی نسبت به پهنه جابه‌جایی اصلی؛ d) بیضوی استرین از کلیه شکستگی‌ها نسبت به پهنه جابه‌جایی اصلی.

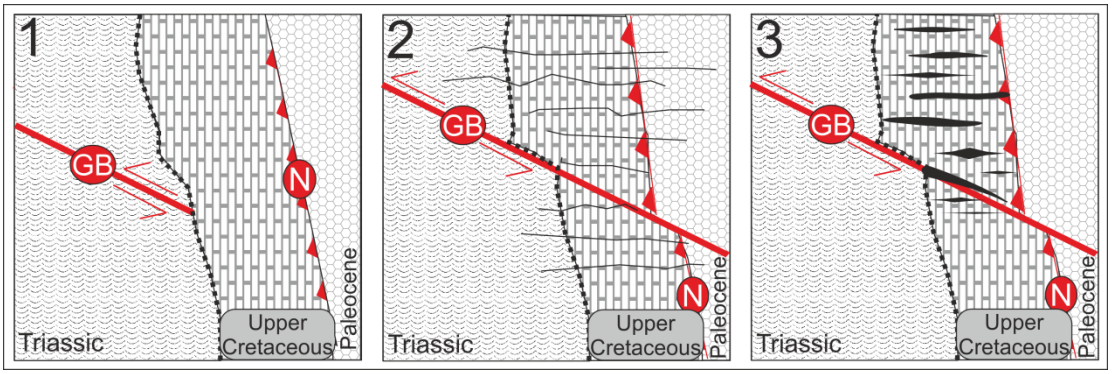
با توجه به این زاویه و نیز با توجه به ماهیت کششی و بازشدگی این رگه‌ها، اکثریت این نوع رگه‌ها را می توان در رده شکستگی‌های نوع T1 طبقه‌بندی نمود. شکستگی‌های نوع T از جمله شکستگی‌های کششی موجود در مناطق شکننده است (Coelhe et al., 2006). این نوع شکستگی‌ها به عنوان شکاف کششی (Tension gashes) نیز معرفی شده‌اند (Ramsy and Huber, 1987). نوسان چند درجه‌ای در حوالی ۴۵ درجه نسبت به پهنه جابه‌جایی اصلی حکایت از اندکی نوسان حرکتی در بلوک طرفین گسل دارد که احتمالا به سبب نوسانات حرکتی گسل قلعه بزرگ می‌باشد. با توجه به جهت‌گیری گسل‌ها، درزه‌ها و نیز رگه‌های معدنی بیضوی استرین مربوطه ارائه شده است (شکل ۲۰d). در این مدل سوی تنش بیشینه (σ_1) تقریبا شرقی-غربی (N85) و سمت تنش کمینه (σ_3) تقریبا شمالی-جنوبی (N 355) است. با توجه به ویژگی‌های ساختاری ذکر شده مدل برشی ساده (Simple shear) را می توان برای ایجاد فضای کانی‌سازی در نظر گرفت.

حرکت گسل‌ها علاوه بر ایجاد شکستگی می‌تواند عاملی برای حرکت و نفوذ سیالات در نظر گرفته شود (Robb, 2005). در کوه نخلک گسل قلعه بزرگ پس از ایجاد فضای خالی ساختاری مناسب به عنوان معبر اصلی سیالات کانه‌دار به سمت سطح عمل نموده تا در ادامه ته‌نشست ماده‌معدنی درون فضاهای خالی صورت پذیرد. از جمله شواهد برای این نظریه حضور بیشترین کانی‌سازی در نزدیکی این گسل و حتی در سطح زمین بوده به طوری که بیشترین فعالیت‌های شدادی در این محدوده صورت گرفته است. با حرکت به سمت سمت شمال و با نزدیک شدن به چاه شماره شش علارغم وجود فضای خالی و سنگ میزبان مناسب، کانی‌سازی قابل توجهی صورت نگرفته است و یا تنها سطوح خارجی فضاهای خالی با قشر نازکی از کانی‌سازی پوشیده شده است (شکل ۲۱).

بین وقایع زمین لرزه، توسعه گسل و جریان سیال با ژنز کانسارهای گرمابی ارتباط وجود دارد. اولین بار واژه مکش لرزه‌ای (seismic pumping) برای توصیف الگوی تئوریکی که در آن چرخش تنش‌های متغیر در داخل و اطراف گسستگی‌ها وجود داشت مطرح گردید که در آن حرکات گسل‌ها می‌تواند به عنوان عاملی جهت پمپاژ سیالات به درون شکستگی‌ها عمل نماید (Sibson et al., 1975). با توجه ویژگی‌های ساختاری همچون امتداد گسل‌ها، درزه‌های کششی مدل تکتونیکی کوه نخلک ارائه شده است (شکل ۲۲). با عملکرد گسل قلعه بزرگ علاوه بر ایجاد شکستگی‌ها و فضای خالی مناسب سیالات کانه‌دار نیز به سمت این فضاها حرکت نموده‌اند. کاهش فشار درون شکستگی‌های گسل و تنشهای برشی باعث تخلیه سیالات در داخل فضای بوجود آمده توسط گسیختگی گسل شده و کاهش آنی فشار سیال در اثر ورود به فضای باز، می‌تواند مواد محلول در سیالات گرمابی را ته نشست دهد و باعث پر شدن مجدد درزهای گسل‌ها شود.



شکل ۲۱. شکستگی با فضای خالی مناسب فاقد کانی‌سازی (آزیموت شکستگی N 86)



شکل۲۲. مدل ساختاری شماتیک از نحوه ایجاد فضای خالی در کربناتهای کرتاسه بالایی

نتیجه‌گیری

برای تشکیل یک کانسار، سیال مولد کانی‌سازی پس از تغییر مکان و مهاجرت، در مکان مناسب تجمع یافته و تشکیل کانسار می‌دهد. کانسارها چه آذرین باشند و چه رسوبی و اسکارن، جایگزینی‌شان توسط عوامل بسیاری کنترل می‌شود (شهاب‌پور،۱۳۸۰). کانی‌سازی در کانسار نخلک درون کربنات‌های دریای کم عمق تا عمیق حاشیه قاره کرتاسه بالایی بصورت چینه کران (Stratabound) و غیرهمزاد (Epigenetic) جایگیر شده و مدل ژنتیکی این کانسار نوع دره می‌سی‌سی‌پی تشخیص داده شده است (جزی و شهاب پور، ۱۳۸۹).

قرارگیری افق مناسب کربناتی کرتاسه بالایی در کنار سنگ‌های عمدتا شیلی سازند عشین بصورت عاملی مهم در نقل و انتقالات سیال کانه دار عمل نموده است؛ بطوری‌که سازند عشین همانند سدی، مانع از عبور و پراکندگی سیالات کانه‌دار بوده و در نتیجه باعث تجمع این سیالات درون درز و شکستگی‌های آهک‌های کرتاسه بالایی شده است.

قرارگیری کربنات‌ها به زیر سطح دگرشیبی می‌تواند احتمال وجود ساختارهای فضای خالی کارستی را بالا ببرد، با این حال در کانسار نخلک با وجود این سطح دگرشیب نقش ساختارهای کارستی در جایگیری ماده معدنی بسیار کمرنگ می‌باشد. علت این موضوع احتمالا به سبب فرصت زمان کمی بوده که آهک های کرتاسه بالایی (Upper Cenomanian to Maastrichtian?) تا ته نشست سنگ‌های پالئوسن (Danian-Thanetian) داشته‌اند تا تحت تاثیر پدیده کارستی شدن قرار بگیرند.

در ستون چینه‌شناسی کربنات‌های کرتاسه بالایی، حضور رخساره‌های ریفی و نیز تغییرات مکرر از آهک به دولومیت علاوه بر بالا بردن نفوذپذیری و کمک به نقل و انتقالات سیال کانه‌دار، بدلیل ایجاد تغییر در نفوذپذیری و متعاقبا تغییر در فشار، خود می‌تواند از جمله عوامل ته نشست ماده‌معدنی تلقی شود. یکی از خصوصیات مهم در کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT) قرارگیری کانسار در دولستون، سنگ آهک و ندرتا ماسه‌سنگ می‌باشد (Leach and Sangster,1993).

پدیده قابل توجه دیگر در سنگ‌شناسی سنگ میزبان پدیده دولومیتی‌شدن می‌باشد. دلومیتی‌شدن به سبب ایجاد فضای خالی در مقیاس میکروسکوپی هم در نقل و انتقال و نفوذ سیالات و هم در جای دادن ماده‌معدنی موثر عمل نموده است.

دولومیت‌های تاخیری (تدفینی و گرمابی) می‌تواند به عنوان میزبان کانی‌سازی عمل کند. بسیاری از کانسارهای MVT در چنین دولومیت‌هایی قرار گرفته‌اند. به طور معمول محلول‌های که عامل این دلومیت‌ها هستند قادر به حمل فلزات نیز هستند. در مکانی که ساختارهای مناسب جهت تمرکز و سیستم اکسایش-کاهش به طور همزمان رخ دهد، ماده معدنی می‌تواند درون سنگ میزبان دلومیتی جایگیر شود (Warren, 2000). دلومیت‌های نوع دوم و یا دلومیت‌های نوع دانه شکری مهمترین نوع دلومیت همراه با ماده‌معدنی است که در فضای بین بلوری آنها گاها توسط گالن پر شده است. این کانی در اطراف رگه‌ها فراوانی بالایی دارند و با فاصله گرفتن از ماده معدنی از فراوانی آن کاسته می‌شود.

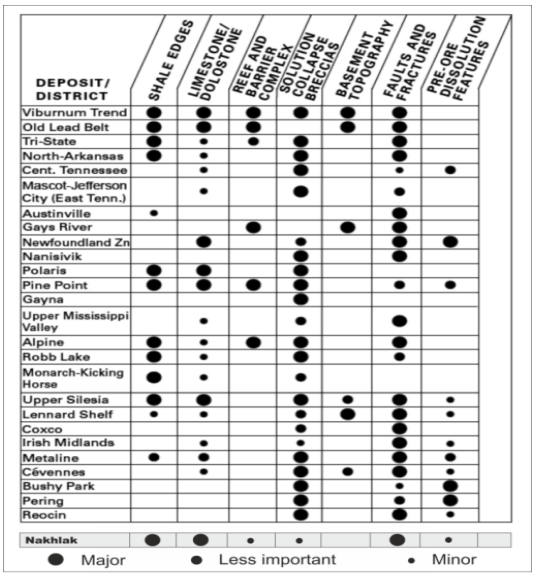
آنچه که مسلم است در کوه نخلک همگی پدیده‌های ذکر شده با نقش و تاثیر متفاوت در جایگیری ماده‌معدنی موثر بوده‌اند. در هریک از مناطق دارای کانی‌سازی کنترل‌کننده‌های فاقد کانی‌سازی نیز وجود دارند که این مسئله نشان می‌دهد جهت ایجاد کانی‌سازی مناسب می‌بایستی چند کنترل‌کننده با یکدیگر رخ دهند و حضور تنها یکی از کنترل‌کننده‌ها شرط کافی برای رخداد کانی‌سازی در آن محل نمی‌باشد (Leach et al., 2005).

در(شکل۲۳) کنترل‌کننده اساسی کانی‌سازی در کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی آورده شده و کانسار نخلک نیز به جهت مقایسه در این شکل آورده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود نقش و تاثیر هر یک از این کنترل‌کنندها برای کانسارهای مختلف متفاوت می‌باشد. در کانسار نخلک نیز به همین شکل بوده و در درجه اول اهمیت گسل‌ها و شکستگی‌ها، سنگ آهک- دلستون و لبه شیلی بوده و در درجه دوم اهمیت ریف‌ها و مجموعه‌های سدی، ویژگی‌های انحلالی قبل کانی‌سازی و برش‌های انحلالی-ریزشی می‌باشند. کنترل‌کننده های مختلف معمولا در ارتباط با یکدیگر هستند. برای مثال لبه ها و مرزهای شیلی، انتقال از حالت سنگ آهک به دولستون و مجموعه‌های ریفی می‌تواند قسمتی از یک رخساره رسوبی باشد که مرتبط با توپوگرافی سنگ پایه (Basement) و یا گسل خوردگی و شکستگی منطقه باشد (Leach et al., 2005). با توجه به روند کانی سازی که از گسل قلعه بزرگ به سمت کمر بالای آن و به سمت شمال منطقه می‌باشد، می‌توان این گسل را به عنوان گسلی عمیق و کانال اصلی جهت نقل و انتقال سیالات کانه‌دار از عمق به درون سنگ‌های کرتاسه بالایی در نظر گرفت که با رسیدن سیالات کانه‌دار به لیتولوژی مناسب و فضای خالی پتروگرافی و ساختاری کانی‌سازی رخ داده است. موقعیت و هندسه اغلب کانسارهای MVT انعکاسی از تقابل بین گسل‌ها، ویژگی‌های انحلالی آهک‌ها در قبال کانی‌سازی و واحد چینه‌ای نفوذپذیر است. کانسارهای کنترل شده توسط گسل بصورت کاملا معنی‌داری در شکل و اندازه تائید تنوعی از کنترل‌کننده های ساختاری و لیتولوژیکی را منعکس می‌کند (Leach et al., 2005).

به جهت پی‌جویی و اکتشاف کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان کربناته ایران شناسایی کنترل کننده‌های کانی سازی همچون محیط تکتونیکی و افق چینه‌ای مناسب (از نظر سن، ستون چینه‌شناسی و سدهای شیلی)، سنگ‌شناسی مناسب (از نظر رخساره‌ریفی، انتقال آهک-دولستونی و دلومیتی شدن) و ساختارهای تکتونیکی ایجاد کننده فضای خالی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

قدردانی

این مقاله مربوط به طرح پژوهشی به شماره ۳/۲۲۷۳۴ مورخ ۱۳۹۱/۴/۱۳ در دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.



شکل ۲۳. خلاصه ای از کنترل کننده های کانی سازی در مناطق منتخب MVT (Leach and Sangster, 1993)

منابع

جزی، م. ع.، شهاب پور، ج.، ۱۳۸۹، بررسی خصوصیات کانی‌شناسی، ساختی، بافتی و ژئوشیمیایی معدن سرب نخلک، اصفهان، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۲(جلد سوم)، ص ۱۳۱-۱۵۱.

خسرو تهرانی، خ.، ۱۳۶۲، چینه‌شناسی کرتاسه بالایی در کوه نخلک و نواحی مجاور آن، نشریه دانشکده فنی، شماره ۴۵، ص ۴۷-۵۴.

قربانی، م.، ۱۳۸۱، دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی اقتصادی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی‌کشور، ۶۵۰ ص.

شهاب پور، ج.، ۱۳۸۰، زمین‌شناسی اقتصادی، انتشارات دانشگاه کرمان، ۵۴۳ ص.

کریم پور، م. ح.، سعادت، س.، ۱۳۸۱، زمین‌شناسی اقتصادی کاربردی، انتشارات ارسلان، ۵۳۵ ص.

وزیری، س. ح.، ۱۳۷۵، مطالعه لیتواستراتیگرافی، بیواستراتیگرافی و محیطهای رسوبی سنگهای تریاس ناحیه نخلک واقع در شمال شرق انارک(محدوده ساختاری ایران مرکزی) و تهیه نقشه ۱:۲۰۰۰۰ ناحیه مورد مطالعه: رساله دکتری(D. Ph)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۳۴۴ ص.

رحیم پور بناب، ح.، ۱۳۸۴، سنگ شناسی کربناته: ارتباط دیاژنز و تکامل تخلخل، انتشارات دانشگاه تهران، ۴۸۷ ص.

Alavi. M., 1991, Tectonic map of the Middle East, scale 1:2,900,000, Geological Survey of Iran.

Alavi.M., Vaziri.S.H., Seyed-Emami.K., and Lasemi.Y., 1997, The Triassic and associated rocks of the Nakhlak and Aghdarband areas in Central and Northeastern Iran as remnants of the Southern Turanian continental margin., G.S.A .Bulletin, Vol:109, No.12, p:1563-1575.

Atkinson.B.k., 1987, Introduction to fracture mechanics and its geophysical applications, in Atkinson, B.K.(ed.), Fracture Mechanics of Rock: Academic Press, London, p:1-26.

Bagheri.B., Stampfli.G. M., 2008, The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in central Iran: new geological data, relationships and tectonic implications, Tectonophysics Vol:451,p:123-155.

Balini.M., Nicoa.A., Berra.F., Garzanti.E., Levera.M., Mattei.M, Muttoni.G., Zanchi.A., Bollati.I., Larghi.C., Zanchetta.S., Salamati.R., Mossavvari.F., 2009. The Triassic stratigraphic succession of Nakhlak (Central Iran), a record from an active margin. In:Brunet.M.F., Wilmsen.M. and Granath J. W. (eds) South Caspian to Central Iran Basins. Geological Society, London, Special Publications, Vol:312, p:287–321.

Belayneh.M., Cosgrove.J. W., 2010, Hybrid veins from the southern margin of the Bristol Channel Basin, UK, Journal of Structural Geology, Vol:32, p:192–201.

Berberian.M., King.G.C.P., 1981, Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran, Canadian Journal of Earth Sciences, Vol:18, p: 210-265.

Ceolho.S., Passchier.C., Marques.F., 2006, Riedel-shear control on the development of pennant veins: Field example and analogue modeling, Journal of Structural Geology,Vol:28, p:1658-1669.

Cherepovsky.N., Plyaskin.V., Zhitiner.N.,Kikorin.V.U., Susov.M., Melnikov.B.and Aistov.L., 1982, Report on detailed geological prospecting in Anarak area (Central Iran) Nakhlak locality., Geol. Surv. Iran and Technoexport Co.(USSR), Rep.No.14, 196 p.

Cox.S.F., Knackstedt.M.A. and Braun.J., 2001, Principles of structural control on permeability and fluid flow in hydrothermal systems. In J.P. Richards and R.M. Tosdal (eds), Structural Controls on Ore Genesis. Reviews in Economic Geology,Vol:14, p:1–24.

Davodzadeh.M., Seyedemami.K., Amidi.M., 1969, Preliminary note on a newly discovered Triassic section northeast of Anarak(Central Iran), with some remarks on the age of the metamorphism in the Anarak region. Geol. Surv. Iran, Note No . 51. (unpublished).

Evans.A. M., 1993, Ore Geology and Industrial Minerals: An Introduction, Blackwell Scientific Publication, 390 p.

Hill.C.A., 1995, H_2S- related porosity and sulfuric acid oil-field karst. In: Budd, D.A., Saller, A.H., Harris, P.M. Eds., Unconformities and Porosity in Carbonate Strata. AAPG Mem,Vol: 63, P:301–306.

Holzer.H. F., and Ghassernipour.R., 1969, Geology of the Nakhlak lead mine area (Anarak district. Central Iran). Geol. Surv. Iran, 44 p.

Leach.D.L., and Sangster.D.F., 1993, Mississippi valley- type lead-zinc deposits: Geological Association of Canada Special paper, Vol:40, p:289-314.

Leach.D.L., Sangster.D.F., Kelley.K.D., Large.R.R., Garven.G., Allen.C.R., Gutzmer.J., and Walters.S.S., 2005, Sediment-Hosted lead-zinc deposits: A Global Perspective : Economic Geology, 100th Anniversary volume, p:501-607.

Leach.D.L., Bradley.D.C., Huston.D., Pisarevsky.S.A., Gardoll.S. and Taylor.R., 2010, Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits in Earth History, Economic Geology, Vol:105, p:593–625

Morton.N; Girty,H.G.; Rockwell.K.T., 2012, Fault zone architecture of the San Jacinto fault zone in Horse Canyon, southern California: A model for focused post-seismic fluid flow and heat transfer in the shallow crust; Department of Geological Sciences, San Diego State University, San Diego, CA 92182, USA

Odling.N.E., 1997, Fluid flow in fractured rocks at shallow levels in the Earth's crust: an overview. In M.B. Holness (ed.), Deformation-enhanced Fluid Transport in the Earth's Crust and Mantle. Chapman & Hall, p:289–98.

Park.F.C. and McDiarmid.R.A., 1975, Ore Deposites, Freeman and Company, 529 p.

Rajabi.A., Rastad.E., 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, iFirst article,p:1–24.

Ramsay.J.G. and Huber.M.I., 1983, The techniques of modern structural geology, vol. 1: Strain Analysis, Academic Press, London, 308 p.

Ramsay.J.G. and Huber.M.I., 1987, The techniques of Modern Structural Geology. Vol 2: Folds and Fractures. Academic

Press, London, 391 p.
Rasa.I., 1987, Geologisch, Petrographische untersuchungen in der Blie _ Lagerstaette Nakhlak , Zentraliran, Heidel. Geo. Abh Band 10, 191 p.
Robb.L.J., 2005, Introduction to ore- forming processes, Blackwell Publishing, 373 p.
Ruttner.A.W., 1993. Southern borderland of Triassic Laurasia in north-east Iran. Geologische Rundschau,Vol:82, p:110–120.
Ruttner.A. and Stöcklin.J., 1967, Geological map of Iran, scale 1:1000,000", Geological Survey of Iran.
Shahabpour.J, 2010, Feedback Concept in the Ore-forming Systems, Resource Geology Vol:60, No:1, p:109–115.
Seyed-Emami.K., 2003, Triassic of Iran, Facies, Vol:48, p:91–106.
Sibson.R.H., Moore.J.M. and Rankin.A.H., 1975, Seismic pumping: a hydrothermal fluid transport mechanism. Journal of the Geological Society London,Vol:131, p:653–659.
Storti.F., Rossetti.F., Laufer.A.L. and Salvinv.F., 2006, Consistent kinematic architecture in the damage zones of intraplate stike- slip fault systems in North Victoria Land, Antarctica and implications for fault zone evolution, Journal of Structural Geology,Vol:27, p:1-14.
Sverjensky.D.A., 1986, Genesis of Mississippi Valley-type lead-zinc deposits, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol:14, p:177-199.
Turner.E.C., 2011, Structural and Stratigraphic Controls on Carbonate-Hosted Base Metal Mineralization in the Mesoproterozoic Borden Basin (Nanisivik District), Nunavut, Economic Geology,Vol:106, p:1197–1223
Vaziri.S.H., Senowbari-Daryan.B., and Kohansal-ghadimvand.N., 2005, Lithofacies and microbiofacies of the Upper Cretaceous rocks (Sadr unit) of Nakhlak area in Northeastern Nain, Central Iran, Journal of Geosciences, Osaka City University , Vol. 48, p:71-80.
Vaziri.S. H., Fursich.F.T. and Kohansal-ghadimvand.N., 2012, Facies analysis and depositional environments of the Upper Cretaceous Sadr unit in the Nakhlak area, Central Iran, Revista
Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol:29, p:384-397.
Warren.J., 2000, Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations, Earth-Science Reviews, Vol:52, p:1–81.
Zanchi.A., Zanchetta.S., Garzanti.E., Balini.M., Berra.F., Mattei.M., Muttoni.G., 2009, The Cimmerian evolution of the Nakhlak-Anarak area, Central Iran, and its bearing for the reconstruction of the history of the Eurasian margin, Geological Society, London, Special Publications, Vol:312, p:261-286.