



## ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی کانسار تیتانیم چشمه‌سیاه شهرضا- اصفهان

سید حسن طباطبایی<sup>۱</sup>، مرتضی طبائی<sup>۲</sup>، مهین منصوری اصفهانی<sup>۳\*</sup>، هوشنگ اسدی هارونی<sup>۴</sup>

۱- استادیار ژئوشیمی اکتشافی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- استادیار زمین‌شناسی نفت، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- استادیار پترولوژی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۴- استادیار مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

\* عهده‌دار مکاتبات: mmansouri\_2001@yahoo.com

دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۴/۲۵، پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۷/۶

### چکیده

کانسار تیتانیم چشمه‌سیاه شهرضا در ۲۵ کیلومتری جنوب شرق شهرضا در استان اصفهان واقع است. این کانسار بر روی کمر بند شهرضا- همبست- آباد در زون سندج- سیرجان قرار دارد. مطالعات صحرایی زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی و تجزیه ژئوشیمیایی در این کانسار نشان داده است که کانی‌سازی اکسید تیتانیم (عمدتاً آناتاز) و ایلمنیت در یک واحد رسی به سن تریاس پیشین به رنگ قهوه‌ای تیره و سیاه کاملاً دگرسان شده، چین‌خورده و تکتونیزه و حاوی آناری از سیل‌های آذرین نفوذی رخ داده است. با توجه به ۳۰ نمونه تجزیه‌شده به روش XRF، عیار میانگین دی‌اکسید تیتانیم در ترانسه‌ها و در بخش‌های سطحی زون کانی‌سازی در حدود ۸/۲۵ درصد برآورد شده است، که حدود دو برابر حد اقتصادی در کانسارهای مشابه است. در نحوه تشکیل این کانسار، به نظر می‌رسد که ابتدا واحد رسی متعلق به تریاس پیشین و سیل‌های آذرین نفوذی بازی (منشأ اصلی تیتانیم) بر اثر فعالیت‌های زمین‌ساختی به‌شدت چین‌خورده، دگرسان و تکتونیزه شده و به دنبال آن با تأثیر فرایند هوازدگی، کانی‌سازی تیتانیم نوع لاتریتی ایجاد شده است. برخی شواهد موجود در مقاطع نازک و صیقلی نشان می‌دهد که بعد از تشکیل بخش اصلی کانسار از راه فرایند لاتریتی‌شدن، محلول‌های گرمایی در مراحل پایانی به‌طور محلی در امتداد گسل‌های منطقه عمل کرده و سهم کمی در غنی‌شدگی کانی‌سازی تیتانیم و اکسید آهن در این کانسار داشته است.

واژه‌های کلیدی: تیتانیم، لاتریت، شهرضا، اصفهان

### ۱- مقدمه

ذخایر تیتانیم دنیا در ماسه‌های ساحلی استرالیا، آفریقای جنوبی، آمریکا، هندوستان و سری‌لانکا تشکیل شده‌اند. ذخایر بزرگ تیتانیم دنیا عمدتاً به سه‌صورت یادشده در کانی‌های ایلمنیت، روتیل- آناتاز یافت می‌شوند. کانی‌های ایلمنیت عمدتاً در رابطه با کمپلکس‌های آنورتوزیت- گابرویی، آناتاز و ایلمنیت در لاتریت‌ها و روتیل و ایلمنیت در پلاسرها است (Chernet, 1999).

مصرف عمده تیتانیم در ایران در صنعت رنگ‌سازی نوع مرغوب به‌صورت رنگدانه سفید دی‌اکسید تیتانیم است، که در حال حاضر، همه آن از خارج از کشور تأمین می‌شود. از جمله ذخایر شناخته‌شده ایران می‌توان به ذخایر تیتانیم کهنوج در استان کرمان و قره‌آغاج در استان آذربایجان غربی اشاره کرد. کانی‌سازی ذخیره تیتانیم کهنوج شامل دو تیپ پلاستی و سنگ‌های حاصل از تبلور ماگمایی با ترکیب آنورتوزیتی است. کانسار ماگمایی قره‌آغاج با عیار میانگین حدود ۸/۵ درصد با ترکیب ایلمنیت و تیتانومگنتیت، ذخیره‌ای افزون بر ۲۰۰ میلیون تن دارد و از ذخایر بزرگ کشور به‌شمار می‌رود (مهدیلو و ایران‌نژاد، ۱۳۸۳). این دو کانسار به دلیل حجم بالای ماده معدنی و عیار نسبتاً مناسب اهمیت ویژه‌ای دارد.

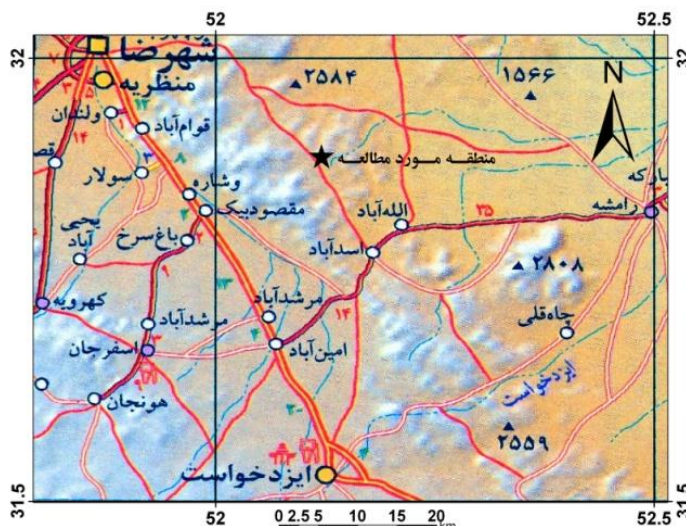
ذخایر تیتانیم به دلیل کاربردهای استراتژیک و مهم آنها در ساخت هواپیما و موشک‌های جنگی و در صنایع رنگ‌سازی، اهمیت فراوانی دارد. عنصر تیتانیم خالص، به رنگ سفید دارای چگالی پایین و مقاومت بالایی است. این عنصر عمدتاً در طبیعت در کانی‌های اکسیدی مانند روتیل و آناتاز به‌صورت  $TiO_2$ ، در ایلمنیت ( $FeTiO_3$ ) و تیتانومگنتیت یافت می‌شود (دانائی، ۱۳۵۳). تیتانیم در صنعت به دو شکل دی‌اکسید تیتانیم و فلز تیتانیم مورد استفاده قرار می‌گیرد، حدود ۹۰ درصد تیتانیم به‌صورت دی‌اکسید است و اغلب در ساخت رنگدانه‌ها کاربرد دارد، ده درصد بقیه نیز به‌صورت فلز در ساخت آلیاژهای مختلف استفاده می‌شود که مهم‌ترین کاربرد آن در صنایع هوا فضا است.

کانی‌سازی تیتانیم با منشأ آذرین عمدتاً در عدسی‌ها، دایک‌ها و یا سیل‌های آنورتوزیتی و گابرویی غنی از ایلمنیت یافت می‌شود. بزرگ‌ترین

## ۲- موقعیت جغرافیایی

روستای میرآباد، مزرعه اسدآباد و همچنین جاده درجه ۲ شرق شهرضا قابل دسترسی است. این منطقه دارای آب و هوای حاشیه کویری بوده و در زمستان سرد و در تابستان بسیار گرم است. پوشش گیاهی بسیار کم است و مزارع چندان وجود ندارد. ارتفاع میانگین منطقه از سطح دریا در حدود ۲۲۰۰ متر است و بیشتر حالت تپه‌ماهوری دارد (شکل ۱).

کانسار تیتانیم چشمه‌سیاه در مختصات طول جغرافیایی  $52^{\circ} 5' 49''$  تا  $52^{\circ} 8' 12''$  شرقی و عرض جغرافیایی  $31^{\circ} 50' 30''$  تا  $31^{\circ} 52' 40''$  شمالی قرار دارد (شکل ۱) و از طریق جاده اصفهان-شهرضا-آباده و

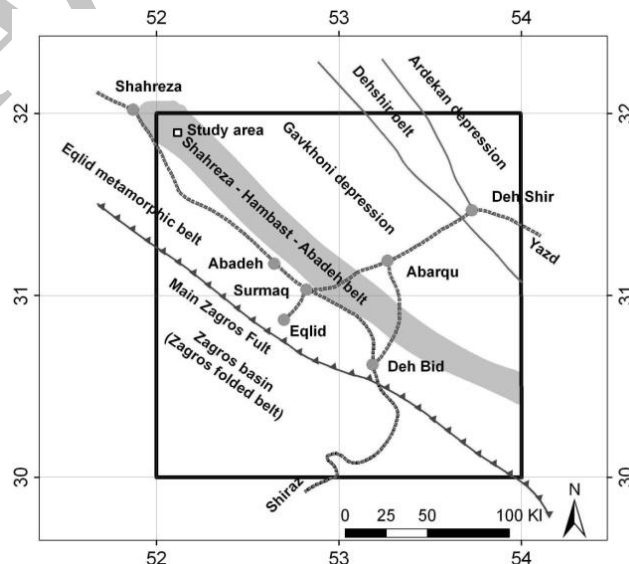


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه (اطلس راه‌های ایران، ۱۳۸۱)

غرب- جنوب شرق است و منطقه‌ای به طول ۲۰۰ کیلومتر و عرض ۲۵ کیلومتر را تحت پوشش قرار می‌دهد (شکل ۲). مرز تریاس و پرمین دارای پیوستگی رسوبگذاری بوده و شامل واحدهای رسی سنگ میزبان، خاک‌های نسوز منطقه آباده و کانسار مورد مطالعه، چشمه‌سیاه، است (نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ سمیرم). فعالیت‌های زمین‌ساختی در این ناحیه به وجود گسل‌ها محدود می‌شود. ساختار مهم زمین‌شناسی کمربند شهرضا-آباده- همبست، سامانه فرازمین- فروزمین (هورست و گرابن) است که از پرکامبرین تاکنون وجود داشته است (Iran-Japanese Research Group, 1980).

## ۳- زمین‌شناسی عمومی منطقه

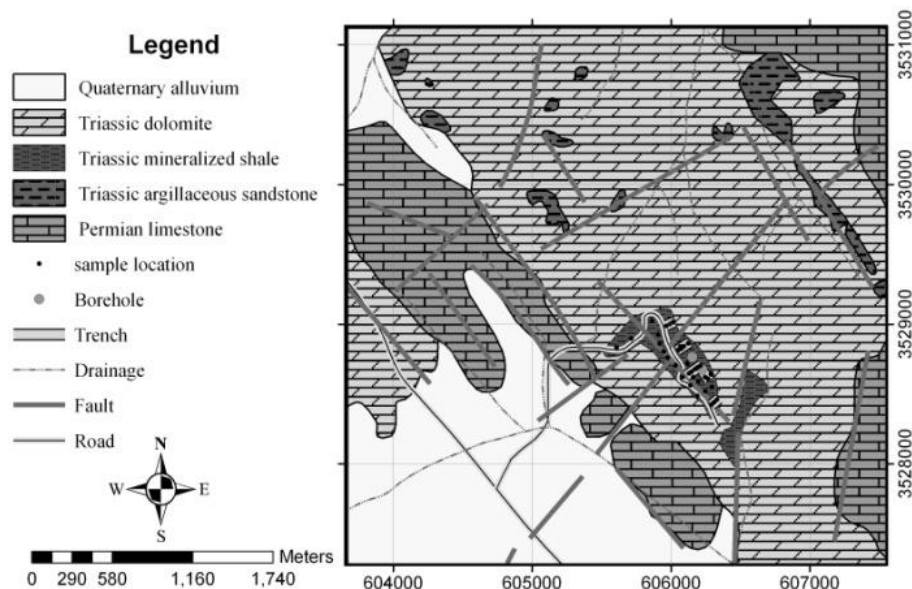
کانسار تیتانیم چشمه‌سیاه در حاشیه شرقی زون ژئودینامیکی سنندج-سیرجان و در ۶۰ کیلومتری شرق گسل اصلی زاگرس و در کمربند شهرضا-آباده- همبست قرار دارد. این کمربند توسط گسل‌هایی از فرورفتگی گاوخونی- ابرقو در شمال شرق و کمربند دگرگونی اقلید در جنوب غرب جدا می‌شود. این کمربند عمدتاً شامل واحدهای سنگی آهکی- دولومیتی- شیلی و رسی با سن پرمین، تریاس، ژوراسیک و کرتاسه با روند شمال



شکل ۲- نقشه کمربند زمین‌ساختی شهرضا-آباده- همبست

۶۸۲ متر می‌رسد. لایه‌های تریاس زیرین شامل آهک‌های نازک‌لایه زردرنگ تا خاکستری و شیل است. لایه‌های تریاس زیرین نیز توسط دولومیت‌هایی که سن آنها احتمالاً تریاس میانی و معادل سازند شتری در شرق ایران است، پوشیده می‌شوند (Taraz, 1974). لایه‌های تریاس زیرین در مقطع سیدعلی‌اکبر حدود ۹۰ متر ضخامت دارند (شکل ۳) (جعفریان، ۱۹۹۱).

بر اساس مطالعات انجام‌شده (Baghbani, 1993) سازند همبست در مقطع سیدعلی‌اکبر (۳۰ کیلومتری شمال محدوده مورد مطالعه) حدود ۸۰ متر ضخامت دارد و دارای سنگ‌نگاری و فسیل‌های کاملاً مشابه با مقطع همبست است. لایه‌های تریاس به دو گروه آهک‌ها، شیل‌های تریاس زیرین و دولومیت‌های تریاس میانی نامگذاری شده که در مجموع ضخامت آنها به



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی محدوده کانسار تیتانیم چشمه‌سیاه به همراه نقاط نمونه‌برداری

#### ۴- روش مطالعه

از مجموعه واحد رسی و سیل تکتونیزه به‌شدت دگرسان شده‌های نفوذی، ۲۰ نمونه برای مطالعات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی برداشت شد. در این مطالعه به منظور تأیید مطالعات میکروسکوپی و دستیابی به نتایج دقیق‌تر از کانی‌های تیتانیم، یک نمونه متعلق به واحد تکتونیزه انتخاب شد و بعد از جداسازی کانی‌های سنگین و تهیه مقطع صیقلی با استفاده از دستگاه الکترون مایکروپروپ نوع Canon در کمپانی بین‌المللی ریوتینتو مطالعه شد.

افزون بر این، برای بررسی خصوصیات ژئوشیمیایی کانی‌سازی کانسار تیتانیم چشمه‌سیاه ۳۵ نمونه از ترانسه‌ها، چاهک‌ها و رخنمون‌ها برداشت شد. از کل این نمونه‌ها، ۱۰ نمونه برای تجزیه شیمیایی کلی ۳۰ عنصری به روش XRF، ۲۰ نمونه فقط برای تجزیه  $TiO_2$  و ۵ نمونه برای آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) در نظر گرفته شدند. تجزیه‌های شیمیایی در آزمایشگاه شرکت کانساران بینالود تهران و تعدادی نیز در آزمایشگاه شیمی سازمان زمین‌شناسی کشور و شرکت نسوزآذر اصفهان انجام گرفت. در تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای GCDkit, Newpet و Statistica استفاده شد.

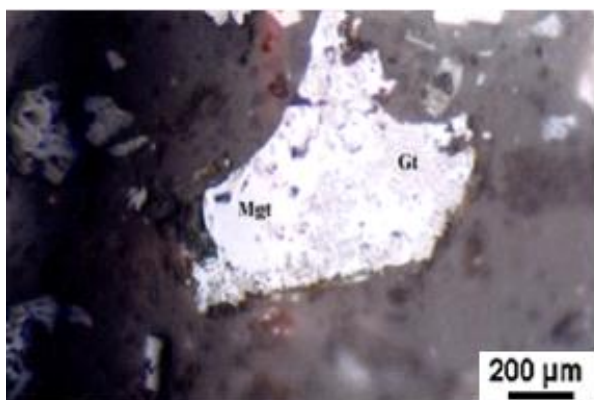
#### ۵- سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی

کانسار تیتانیم چشمه‌سیاه، با روند NW-SE، حدود یک کیلومتر

طول، ۳۰۰ متر عرض و ۵۰ متر ضخامت دارد. بخش اصلی سنگ‌نگاری این کانسار شامل مجموعه واحد رسی حاوی سیل‌های نفوذی (سنگ میزبان تیتانیم) است. این واحد به‌شدت تحت تأثیر فعالیت‌های زمین‌ساختی قرار گرفته است. رنگ این واحد در مشاهدات صحرایی غالباً خاکستری تا قهوه‌ای تیره بوده و در بخش‌های پرعبار به رنگ خاکستری دیده می‌شود. در بخش‌هایی از آن وجود اکسید آهن به میزان بالا سبب قرمزی و نیز ناخالصی منگنز شده است و تیتانیم، آن را به رنگ سیاه نمایان می‌سازد. حضور کانی‌های رسی مانند کائولینیت، آلونیت و مونت‌موریلونیت به همراه مقادیر بالای اکسیدهای آهن، تیتان و منگنز حکایت از تأثیر عملکرد یک فاز لاتریتی شدن و غنی‌شدگی از اکسید تیتانیم بعد از تشکیل رسوبگذاری و نفوذ سیل‌هایی با ترکیب آذرین بازی در این واحد رسی را نشان می‌دهد. در منطقه مورد مطالعه بر روی واحد رسی تریاس زیرین، یک واحد دولومیتی تکتونیزه با سن تریاس میانی قرار گرفته است. واحد رسی تریاس زیرین شامل دو واحد سنگی متفاوت با ترکیب ماسه‌سنگ رسی و شیل رسی است. در ضمن یک واحد سنگ آذرین (سیل با ترکیب دولریت-دیاباز) در محل برخورد سنگ‌های شیلی و دولومیتی مشاهده می‌شود که در ادامه شرح مختصری از آنها ارائه می‌شود:

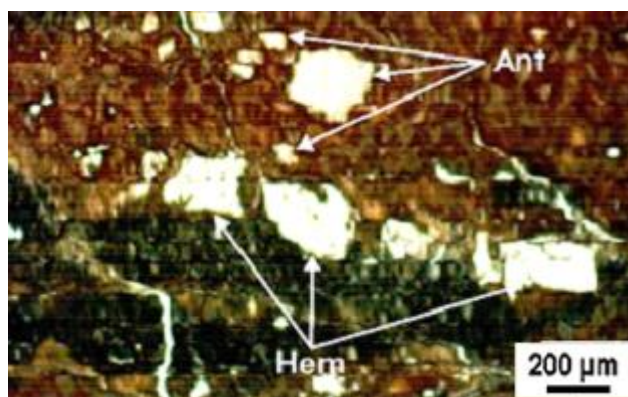
- **ماسه‌سنگ رسی:** بلورهای ریزدانه کوارتز بی‌شکل با خاموشی موجی بخش عمده آن را تشکیل می‌دهند. زمینه سنگ از کانی‌های رسی و فلزی تشکیل شده است. همچنین تعداد زیادی ذرات اکسید آهن مانند هماتیت و گوتیت در ارتباط با بلورهای ریز کوارتز مشاهده می‌شود. گاهی رگه‌های

سنگ، تبدیل‌شدگی مگنتیت به هماتیت و گوتیت است. بعضی از مگنتیت‌های مشاهده‌شده احتمالاً از نوع تیتانومگنتیت است (Ineson, 1989) (شکل ۵).



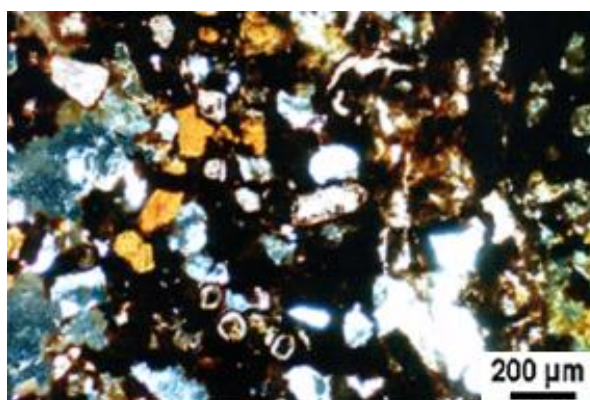
شکل ۵- تصویر میکروسکوپی فرایند تبدیل مگنتیت (Mgt) به گوتیت (Gt) در ماسه‌سنگ رسی (در نور PPL)

رگه و رگچه‌هایی ظریف به پهنای کمتر از ۰/۵ میلی‌متر، به همراه اکسیدهای آهن مانند گوتیت و هماتیت زمینه شیبستوارگی سنگ را قطع کرده است. همچنین کانی‌های فلزی در راستای سطوح شیبستوارگی موجود در سنگ تشکیل شده‌اند. با توجه به مطالعه میکروسکوپی کانی‌های فلزی موجود در واحد رسی کانی‌سازی‌شده و به‌شدت دگرسان و تکتونیزه شده (سنگ میزبان اصلی کانسار تیتانیم چشمه‌سیاه)، می‌توان کانی‌هایی مانند گوتیت، هماتیت، مگنتیت، آنتاز و احتمالاً تیتانومگنتیت را تشخیص داد (Craig, 1981). در یکی از نمونه‌ها کانی آنتاز به‌صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار در ابعاد حدود ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر دیده می‌شود (شکل ۷). شکل ۸ تصویر ریز پردازش بلور آنتاز را به منظور تأیید مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد. خردشدگی کانی‌ها نیز نشان‌دهنده فعالیت‌های زمین‌ساختی بوده و فرایند لاتریتی شدن بعد از تشکیل کانی‌ها، منجر به پرعیار شدن کانسار تیتانیم شده است.



شکل ۷- تصویر میکروسکوپی کانی‌های آنتاز و هماتیت در مقطع صیقلی از سنگ شیل رسی (در نور PPL) (علامت اختصاری کانی‌ها از Kretz, 1983 است)

هماتیت، گوتیت و کوارتز زمینه اصلی سنگ را نیز قطع کرده‌اند. افزون بر این، مقدار نسبتاً زیادی کانی‌های ریزدانه کروی شکل مشاهده می‌شود که احتمالاً کانی‌های اکسید آهن هستند (شکل ۴). زمینه اصلی این سنگ اگر چه دگرسان شده اما کمتر خردشدگی نشان می‌دهد. ویژگی اصلی این



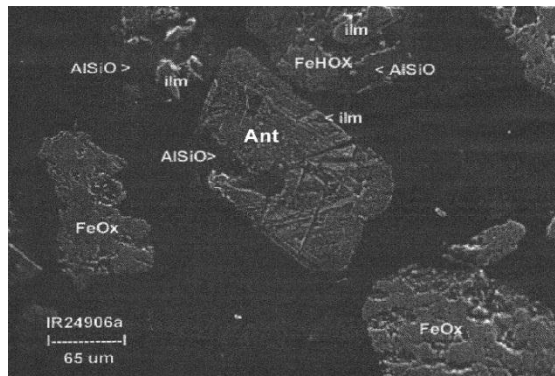
شکل ۴- تصویر میکروسکوپی ماسه‌سنگ رسی به همراه کانی‌های کدر (در نور XPL)

شیل رسی: این واحد رسی حاوی کانی‌های اکسید تیتانیم و ایلمنیت است و سنگ میزبان کانسار تیتانیم چشمه‌سیاه را تشکیل می‌دهد. غنی‌ترین محل کانی‌سازی اکسید تیتانیم در محل برخورد دو گسل با روند شمال غرب- جنوب شرق (روند زون سنندج- سیرجان و زاگرس) و شمال شرق- جنوب غرب قرار گرفته است. حفر ترانشه و نمونه‌برداری از زون کانی‌سازی اکسید تیتانیم در واحد رسی چین‌خورده و تکتونیزه‌شده، وجود اکسید تیتانیم با عیار متوسط ۸/۲۵ درصد را تأیید می‌کند.

مطالعات سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که این سنگ دارای سطوح شیبستوارگی ظریفی است که گاهی در امتداد آنها خردشدگی و چین‌خوردگی دیده می‌شود. این مشاهدات می‌تواند حکایت از عملکرد شدید زمین‌ساختی باشد. با توجه به مطالعات ماکروسکوپی و میکروسکوپی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، این سنگ را می‌توان یک شیل- رسی نامید (شکل ۶). کوارتز به‌صورت کانی غالب این سنگ در ابعاد ریز و نیز در اندازه‌های مختلف با خاموشی موجی نمایان است. گاهی کوارتز در داخل



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی سنگ شیل رسی با ناخالصی اکسید آهن و رگه‌های کوارتز (در نور PPL)



شکل ۸- تصویر ریزپردازش از بلورهای آناتاز، ایلمنیت و اکسیدهای آهن در کانسنگ اصلی

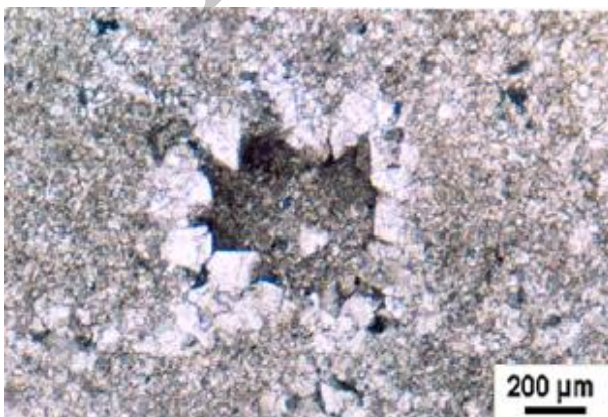
- واحد دولومیتی: این واحد که بر روی بخش بالایی کانسار تیتانیم قرار دارد، به رنگ خاکستری تا قهوه‌ای مایل به زرد، در ابعاد ریز و به شکل متراکم ظاهر می‌شود، به گونه‌ای که در قاعده دارای لایه‌بندی و به طرف بالا توده‌ای است (شکل ۹).



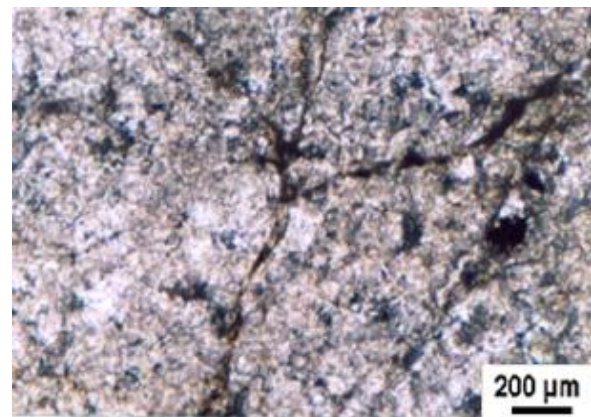
شکل ۹- ارتباط چینه‌شناسی دولومیت (Dol) و لایه شیل رسی (Sh) حاوی تیتان به همراه موقعیت ترانسه‌های AB و CD

میکرواسپاریت است. در این سنگ، شکستگی‌های بسیار ظریف با پرشدگی اکسید آهن و گاهی بعضی از شکستگی‌ها توسعه یافته و توسط کلسیت در ابعاد اسپاریت مشاهده می‌شود (شکل ۱۰). این واحد سنگی دارای حفره‌هایی است که توسط دولومیت میکریتی پر شده و نیز در جدار آن حفره‌ها، مکان مناسبی برای رشد بلورهای دولومیت در ابعاد اسپاریت فراهم ساخته است (شکل ۱۱).

این سنگ‌ها از نظر چینه‌شناسی با سازند دولومیتی شتری با سن تریاس میانی در ایران مرکزی قابل مقایسه بوده و مرز زیرین آن با مجموعه شیلی-رسی تیتانیم‌دار با ناپیوستگی فرسایشی مشخص می‌شود. به دلیل فرسایش‌پذیری ناچیز سنگ‌های دولومیتی در محدوده کانسار تیتانیم، قله ارتفاعات و ستیغ کوه‌ها از این دولومیت‌ها تشکیل شده است. زمینه اصلی واحد دولومیتی در مطالعات میکروسکوپی، دارای ابعاد



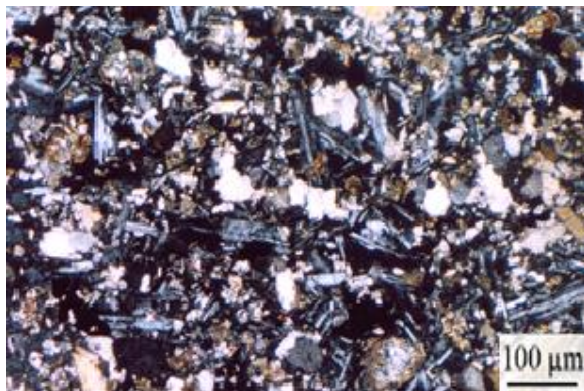
شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپی حفره دولومیکریتی با جداره‌ای از تبلور بلورهای شکل‌دار دولومیت در ابعاد اسپاریت (در نور XPL)



شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپی دولومیت به همراه رگه‌های آهن‌دار (در نور XPL)

– سیل دولریتی- دیاباز: در امتداد و در زیر لایه‌بندی دولومیت‌های تریاس میانی و در بخش‌های بالایی واحد رسی لایه‌های سیل با ترکیب دولریت- دیاباز و با جهت N20W مشاهده می‌شود (شکل ۱۲). این واحد سنگی در مطالعات میکروسکوپی دارای کانی‌هایی مانند کلینوپیروکسن

(اوژیت)، پلاژیوکلاز بازی و تعدادی کانی اولیوین بوده و در بافت‌های اینترسرتال و گاهی بین‌دانه‌ای ظاهر می‌شود (شکل ۱۳). لایه‌های سیل احتمالاً می‌تواند منشأ اصلی تیتانیم موجود در مجموعه واحد رسی تکتونیزه باشد.



شکل ۱۳- بافت اینترسرتال و گاه بین‌دانه‌ای در سنگ دولریت- دیاباز مربوط به سیل‌های منطقه مورد مطالعه (در نور XPL)



شکل ۱۲- رخنمون سیل دیابازی در مجاورت لایه دولومیتی

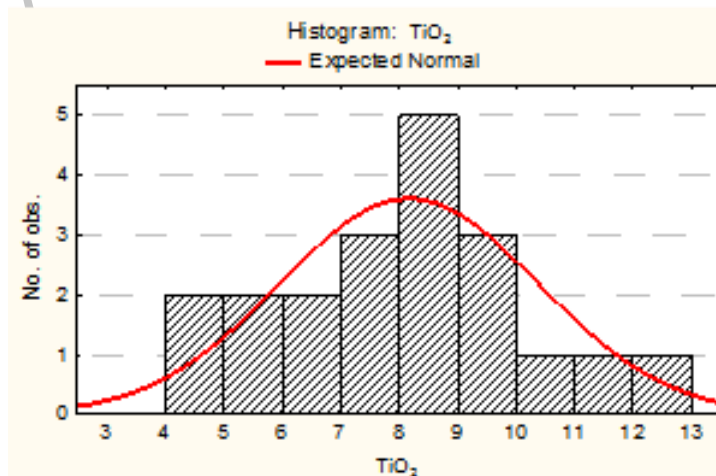
۶- بررسی‌های ژئوشیمیایی کانی‌سازی تیتانیم  
به‌منظور بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی کانی‌سازی تیتانیم شهرضا طی

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی اکسید تیتانیم در ۲۰ نمونه از ترانسه‌های مربوط به حاشیه کانی‌سازی

درصد تعداد نمونه‌ها	TiO <sub>2</sub>									
	۱-۱۰	۸/۷	۴/۰	۹/۶	۵/۶	۸/۸	۷/۹	۹/۰	۶/۹	۱۱/۳
۱۱-۲۰	۵/۷	۶/۸	۹/۹	۸/۰	۳/۲	۱۳/۰	۱۰/۶	۸/۳	۷/۰	۴/۷

کل کانسار در بخش‌های سطحی در نظر گرفت. بیشترین درصد TiO<sub>2</sub> در این نمونه‌ها مربوط به خاک‌های شیل رسی تکتونیزه خاکستری‌رنگ است.

با توجه به هیستوگرام فراوانی، دامنه تغییرات TiO<sub>2</sub> بین ۴ تا ۱۳ درصد بوده و عیار میانگین TiO<sub>2</sub> کل نمونه‌ها، ۸/۱۷ درصد است (شکل ۱۴). این عیار میانگین را می‌توان به دلیل نمونه‌برداری سیستماتیک برای



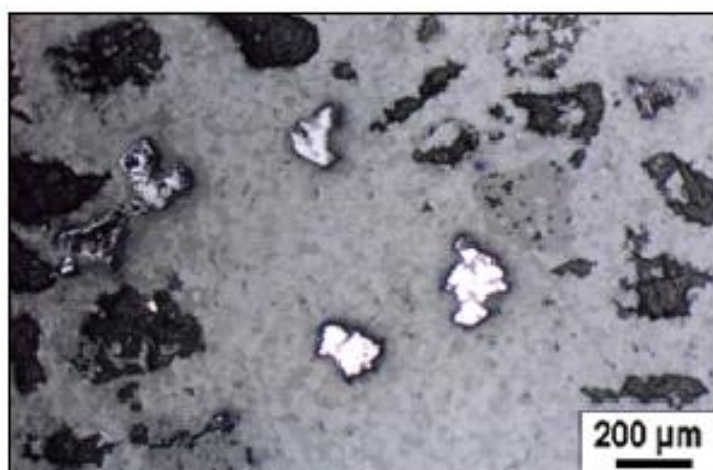
شکل ۱۴- نمودار هیستوگرام فراوانی توزیع اکسید تیتانیم در ۲۰ نمونه از ترانسه‌های مربوط به حاشیه کانی‌سازی

ده نمونه نیز به طور سیستماتیک از ترانسه، چاهک و رخنمون‌های مربوط به بخش‌های مرکزی زون کانی‌سازی (واحد شیل رسی تکتونیزه)، و همچنین از ماسه‌سنگ رسی برداشت شد و به منظور تعیین عیار  $TiO_2$  و اکسیدهای اصلی و عناصر جزئی به روش XRF تجزیه شدند (جدول ۲). عیار  $TiO_2$  از ۵/۷۹ تا ۱۴/۶۸ درصد متغیر است. بالاترین میزان عیار  $TiO_2$  در نمونه شماره ۲۱ است. در این نمونه فزونی عیار گوگرد (ppm)

۱۶۸۱۴) و کاهش درصد  $MgO$  و  $CaO$  می‌تواند حکایت از تشکیل پیریت به جای تشکیل کانی ژیپس باشد (شکل ۱۵). در این نمونه‌ها عیار میانگین به میزان ۸/۴ درصد محاسبه شد. میانگین عیار  $TiO_2$  محاسبه شده در این ۱۰ نمونه با تجزیه‌های تک‌عنصری بسیار مشابه است. عیار میانگین اکسید آهن در این نمونه‌ها ۲۱/۶۳ درصد است.

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمیایی اکسید تیتانیم در ۱۰ نمونه از ترانسه‌های مربوط به مرکز کانی‌سازی و سنگ مادر به روش XRF

نوع سنگ	دولریت- دیاباز	شیل رسی									ماسه‌سنگ رسی	
		۲	۳	۷	۱۱	۱۷	۲۱	۲۵	۲۶	۲۲	۲۸	
شماره نمونه‌ها	۳۰											
Oxide wt. %												
SiO <sub>2</sub>	۵۰/۵۳	۴۰/۰۹	۳۶/۳۶	۳۹/۸۲	۴۱/۵۸	۳۶/۱۵	۳۴/۰۶	۳۷/۴۶	۴۱/۵۵	۵۰/۸۶	۵۲/۳۵	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۳/۱۱	۱۵/۲۷	۲۲/۳۸	۲۱/۹۹	۲۳/۷۰	۲۱/۸۰	۱۷/۸۶	۱۹/۲۳	۲۵/۰۵	۲۴/۸۶	۳۰/۴۷	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۲/۷۷	۲۸/۷۹	۲۶/۵۰	۲۴/۹۷	۱۷/۲۸	۲۷/۱۶	۲۸/۴۷	۳۰/۶۴	۲۰/۵۸	۷/۴۵	۴/۴۳	
CaO	۱۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۶۶	۰/۵۸	۱/۰۵	۰/۵۹	۰/۵۰	۰/۸۸	۰/۷۳	۰/۷۸	۰/۳۳	
Na <sub>2</sub> O	۲/۲۷	۰/۲۳	۰/۷۵	۰/۹۶	۰/۳۸	۰/۲۶	۰/۶۸	۰/۶۳	۰/۲۲	۰/۶۸	۰/۳۲	
K <sub>2</sub> O	۰/۷۲	۱/۲۵	۰/۵۴	۰/۵۸	۱/۱۲	۰/۵۰	۰/۳۴	۰/۹۱	۰/۱۲	۰/۹۶	۰/۶۵	
MgO	۴/۱۱	۲/۴۱	۰/۵۷	۰/۶۸	۰/۹۶	۰/۶۰	۰/۳۱	۰/۸۸	۰/۶۲	۰/۷۸	۰/۴۷	
TiO <sub>2</sub>	۱/۶۲	۷/۴۵	۸/۴۱	۹/۳۲	۹/۰۴	۸/۰۳	۱۴/۶۸	۷/۹۱	۵/۷۹	۷/۵۳	۵/۸۲	
MnO	۰/۱۸	۰/۰۶۴	۰/۲۶۱	۰/۰۴۷	۰/۰۶۰	۰/۱۵۰	۰/۰۳۷	۰/۵۱۷	۰/۱۲۸	۰/۰۱۲	۰/۰۰۹	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۳۰	۰/۰۸۰	۰/۲۶۱	۰/۱۱۲	۰/۱۶۷	۰/۱۴۴	۰/۱۱۵	۰/۳۶۷	۰/۷۵۷	۰/۰۹۵	۰/۱۲۴	
Trace elements (ppm)												
S	۸۶۱	۱۵	۲۶۴۰	۴۸۷۹	۶۰۹۵	۲۹۴	۱۶۸۱۴	۲۰	۲۱۸۶	۴۲۸۲	۱۲۴۶	
V	۱۷۳	۶۳۰	۶۷۷	۷۴۰	۷۰۷	۶۷۹	۱۰۳۶	۶۱۴	۴۶۴	۵۵۶	۴۱۳	
Cr	۲۴۳	۲۰۶	۱۳۲	۱۴۶	۱۸۱	۱۰۸	۲۰۱	۱۳۸	۱۷۱	۱۷۶	۲۰۰	
Co	۴۶	۵۰	۱۰۵	۳۱	۲۸	۵۵	۲۰	۸۳	۵۸	۲۰	۱۳	
Ni	۱۳۰	۱۰۹	۷۳	۵۳	۵۲	۵۱	۴۸	۱۳۲	۵۹	۷۴	۵۹	
Cu	۱۱۴	۷۱	۵۶	۶۶	۶۸	۵۲	۵۷	۶۱	۴۶	۳۶	۱۳۵	
Zn	۱۴۹	۲۴۴	۱۰۲	۱۶۱	۵۵	۱۱۷	۱۴۰	۲۵۹	۱۰۶	۸۳	۶۵	
Rb	۲۱	۵۶	۲۵	۳۰	۳۲	۲۷	۲۸	۴۰	۱۷	۳۱	۲۳	
Sr	۴۷۱	۸۸۴	۹۰۳	۸۵۳	۱۷۶۲	۸۰۳	۸۸۴	۹۴۳	۳۳۳۱	۹۷۵	۹۲۸	
Y	۳۱	۲۸	۴۳	۵۲	۳۱	۱۹	۷۸	۲۰	۱۵	۴۴	۸۹	
Nb	۳۳	۴۴	۵۱	۵۸	۵۷	۵۰	۸۵	۴۶	۳۹	۷۱	۷۰	
Ba	۴۱۹	۱۰۸۴	۱۳۲۰	۱۳۷۹	۱۴۰۸	۱۲۷۶	۲۲۰۳	۱۴۴۱	۱۳۱۱	۱۱۶۵	۸۵۸	
Pb	۶	۱۲	۷	۸	۱۴	۷	۱۲	۳	۴	۱۳	۲۱	
Th	۸	۱۱	۱۳	۱۴	۱۲	۱۳	۱۷	۱۶	۷	۱۰	۱۸	
U	۳	۶	۲	۶	۸	۱	۳	۴	۲۵	۱	۴	
Mo	۱	۱	۲	۲	۷	۱	۵	۲	۱	۱۶	۲۴	
Zr	۱۸۷	۳۸۸	۴۹۳	۶۰۶	۵۴۶	۵۱۷	۶۷۸	۴۸۹	۴۳۲	۵۰۶	۵۱۰	
As	۱۱	۲۱	۲۳	۲۵	۱۹	۳	۳۱	۲۰	۱۲	۱۸	۵	



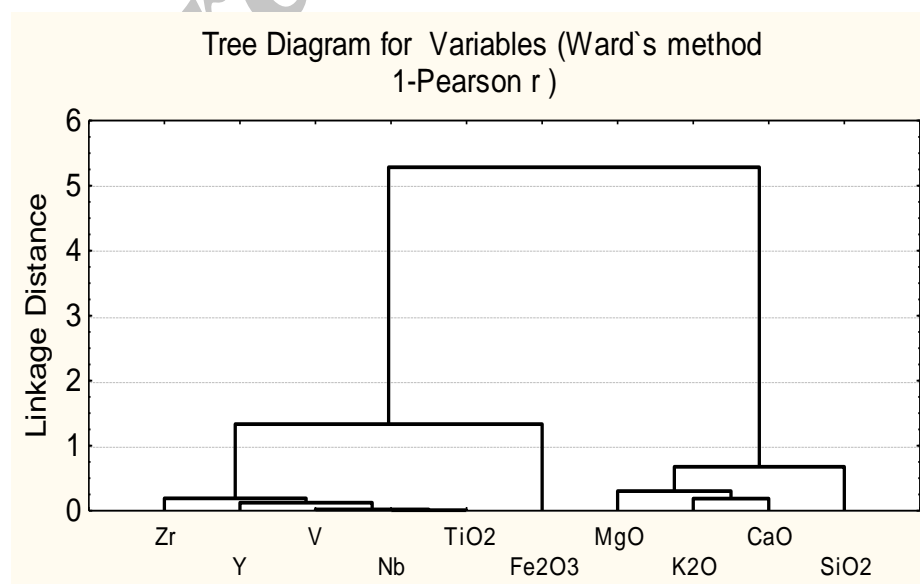
شکل ۱۵- بلورهای نیمه‌شکل‌دار پیریت و مگنتیت (در نور PPL)

نمودارهای Ti-Zr (Hallberg, 1984) و  $Zr/TiO_2 \times 0.001-Nb/Y$  (Winchester et al., 1977) در محدوده سنگ‌های بازالتی قرار می‌گیرند (شکل ۱۷- الف و ب). بدین لحاظ معادل سنگ‌های بازالتی که رگه‌های دولریت-دیاباز موجود در منطقه هستند را می‌توان به‌عنوان محتمل‌ترین سنگ مادر این نهشته در نظر گرفت.

شاخص‌های بسیاری مانند نسبت (Ruxton Ratio, R)  $SiO_2/Al_2O_3$  شاخص هوازدگی شیمیایی (Weathering Index, CWI) شاخص شیمیایی هوازدگی (Chemical Index of Weathering, CIW) شاخص سیلیس-تیتان (Silica-Titania Index, STI) و شاخص سیلیس-آهن (Jenny Ratio, SF) برای ارزیابی شدت فرایندهای هوازدگی شیمیایی سنگ‌های هوزده پیشنهاد شده‌اند (Ruxton, 1968, Sueoka, 1988, Jenny, 1941, Harnois, 1988, De Jayawardena et al., 1994) (جدول ۳).

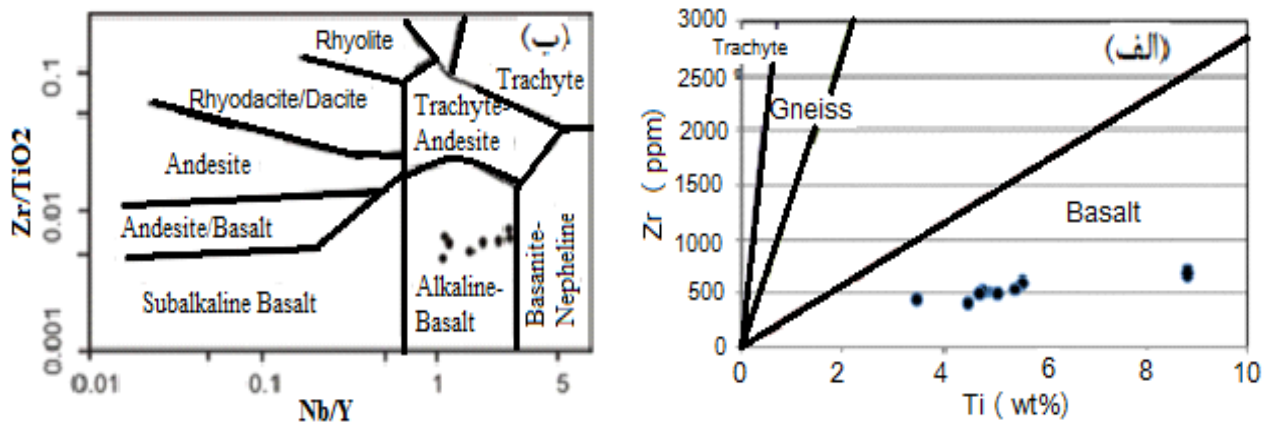
در این پژوهش به‌منظور تشخیص ارتباط بین عناصر در پدیده لاتریتی شدن از تحلیل خوشه‌ای (Cluster Analysis) عناصر اصلی و فرعی شیل رسی استفاده شد. شکل ۱۶ همبستگی بالای اکسیدهای  $TiO_2$  و  $Fe_2O_3$  و رفتار مشابه آنها با عنصر V که می‌تواند مبین به تله‌افتادن عناصر سیدروفیل طی فرایندهای هوازدگی باشد را نشان می‌دهد (Nesbitt et al., 1992). با وجود عناصری مانند Zr که از نظر شیمیایی، بی‌حرک‌ترین عنصر طی فرایندهای هوازدگی به‌شمار می‌رود، می‌توان این خوشه را تمرکز خوشه عناصر بی‌حرک نامید.

با توجه به ضرایب همبستگی بالای عناصری مانند Nb, Zr, Ti و Y در این نهشته ( $R = 0.81 - 0.99$ ) روند غنی‌شدگی تقریباً یکنواختی در طی فرایندهای لاتریتی شدن در منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود، و نسبت‌های آنها در مقایسه با سنگ مادر تقریباً ثابت مانده است (Braun et al., 1993). بنابراین داده‌های مربوط به نمونه‌های شیل رسی در



شکل ۱۶- تحلیل خوشه‌ای عناصر اصلی و فرعی در نمونه‌های شیل رسی منطقه چشمه‌سیاه





شکل ۱۷- الف) پراکنندگی نمونه‌های شیل رسی در محدوده بازالت، ب) در محدوده بازالت قلیایی مشاهده می‌شود

جدول ۳- خلاصه مشخصات شاخص‌های هوازدگی

Index	Abbreviation Name	Formula	Reference
R	Ruxton Ratio	$SiO_2/Al_2O_3$	[19]
CWI	Chemical Weathering Index	$(100)[Al_2O_3+Fe_2O_3+TiO_2+L.O.I]/all\ chemical\ components$	[20]
SF	Jenny Ratio	$SiO_2/Fe_2O_3$	[21]
CIW	Chemical Index of Weathering	$(100)[(Al_2O_3)/(Al_2O_3+CaO+Na_2O)]$	[22]
STI	Silica-Titania Index	$(100)(SiO_2/TiO_2)/[(SiO_2/TiO_2)+(SiO_2/Al_2O_3)+(Al_2O_3/TiO_2)]$	[23]

اصلی در این کانسار معرفی کرد. در یک نمونه کانی روتیل ( $TiO_2$ ) و نیز کانی مگنتیت به‌عنوان کانی‌های فرعی معرفی شدند که می‌توانند نشان‌دهنده تشکیل کانی تیتانومگنتیت باشد. در این نمونه‌ها کانی‌های دیگری مانند گوتیت، همتیت، کائولن، ناتروآلونیت، آلونیت، ژیپس، کوارتز، مونت‌موریلونیت، جاروسیت، ناتروجاروسیت و فلدسپار نیز تشخیص داده شد.

#### ۷- نتایج و نحوه تشکیل احتمالی کانسار تیتانیم شهرضا

تمامی شواهد در کانسار تیتانیم چشمه‌سیاه شهرضا در مجموعه واحد رسی - سیل‌های نفوذی کاملاً تکتونیزه و دگرسان‌شده، حکایت از عملکرد فرایند فرسایش و هوازدگی (فرایند لاتریتی‌شدن) دارد به‌گونه‌ای که در افق‌های خاصی ترکیبات قلیایی مانند  $Na_2O$ ،  $K_2O$ ،  $CaO$  و  $MgO$  تحت تأثیر آبهای جوی از بخش‌های بالایی تهی شده و در نتیجه غنی‌شدگی تیتانیم به‌صورت اکسید (عمدتاً آاناتاز) و ایلمنیت صورت گرفته است. شواهد عبارتند از:

۱- مشاهدات صحرایی، مطالعات سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و همچنین ژئوشیمیایی نشان داد که سنگ میزبان کانی‌سازی تیتانیم در کانسار چشمه‌سیاه مجموعه واحد به‌شدت تکتونیزه، چین‌خورده و دگرسان شده رسی - سیل‌های نفوذی است و عمدتاً حاوی کانی دی‌اکسید تیتانیم،

مقایسه نتایج به‌دست آمده از محاسبات این شاخص‌ها در نمونه‌های شیل رسی منطقه مورد مطالعه با مقادیر ارائه‌شده برای سنگ‌های سالم و کاملاً هوازده (جدول ۴)، بیانگر شدت فرایندهای هوازدگی شیمیایی در شکل‌گیری این نهشته است. دامنه تغییرات ۹۶/۳۵-۹۲/۶۶ درصدی، میزان شاخص هوازدگی شیمیایی (CIW) در کانسنگ‌های این نهشته با در نظر گرفتن مقدار نظری کمتر از ۵۰ این شاخص برای سنگ‌های کاملاً سالم جدول ۴، حکایت از خروج عناصر  $Ca$  و  $Na$  در فرایندهای لاتریتی‌شدن و به عبارت دیگر تبدیل فلدسپارهای سنگ مادر به کانی‌های رسی در شکل‌گیری این نهشته دارد. کاهش شاخص‌های  $R$  و  $SF$  و افزایش  $CIW$  نسبت به سنگ مادر دولریت-دیاباز در کانسنگ مورد مطالعه حاکی از غنی‌شدگی عناصر  $Al$ ،  $Fe$  و  $Ti$  و خروج بخشی عنصر  $Si$  طی فرایندهای هوازدگی است (جدول ۴). با توجه به الگوی توزیع و غنی‌شدگی عناصر  $Al$ ،  $Si$  و  $Fe$  شکل ۱۸، شرایط لاتریتی‌شدن متوسط در منطقه حکمفرما بوده است (Schellmann, 1983).

همچنین، ۵ نمونه از ترانسه‌های بخش‌های مرکزی زون کانی‌سازی (واحد رسی تکتونیزه و دگرسان‌شده) به روش XRD در دو آزمایشگاه مختلف کانساران بینالود (دو نمونه) و سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشور (سه نمونه) تجزیه شیمیایی شدند (جدول ۵).

نتایج هر پنج نمونه بدون تردید، کانی آاناتاز ( $TiO_2$ ) را به‌عنوان کانی

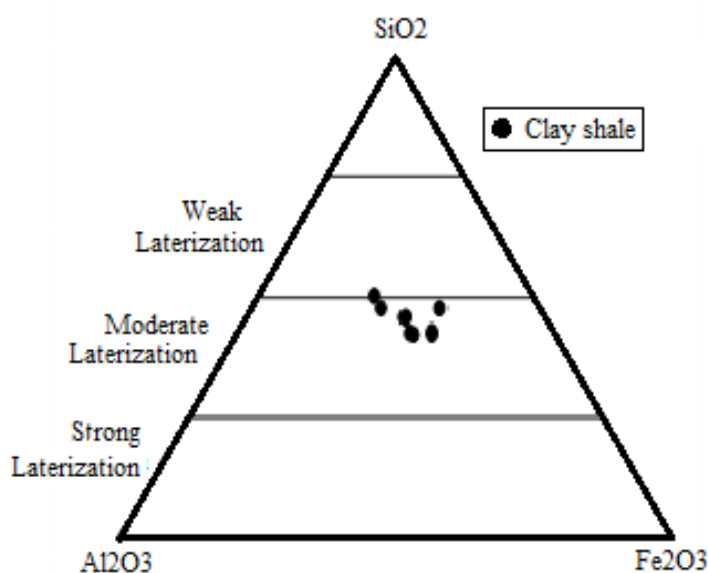
XRD در یک نمونه دگرسان شده حضور کم مگنتیت را ثابت کرد.  
 ۴- کاهش درصد اکسیدهای  $\text{CaO}$ ،  $\text{Na}_2\text{O}$ ،  $\text{SiO}_2$  و  $\text{MgO}$  و افزایش اکسیدهای  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{TiO}_2$  به همراه عناصر  $\text{V}$  و  $\text{Zr}$  در سنگ میزبان تیتانیم بیانگر حاکم بودن شرایط لاتریتی شدن در محیط است (جدول ۲) (شکل ۱۹) (Hill et al., 2000; Kurtz et al., 2000).  
 ۵- حضور رگه‌های هماتیت، گوتیت و کوارتز بافت اصلی سنگ میزبان را در برخی موارد قطع کرده‌اند که این پدیده می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر زمین‌ساخت و چندمرحله‌ای بودن تشکیل کانسار و احتمالاً عملکرد یک فاز احتمالی گرمایی در مراحل انتهایی و بعد از تشکیل کانسار تیپ لاتریتی در کانسار چشمه‌سیاه را نیز می‌تواند نشان دهد (شکل‌های ۵ و ۶).

ایلمنیت، کائولینیت، مونت‌موریلونیت و اکسیدهای آهن به میزان بالاست.  
 ۲- نمونه‌های شیل‌های رسی در نمودارهای دو متغیره  $\text{Ti-Zr}$  و  $\text{Zr/TiO}_2$   $\times 0.0001\text{-Nb/Y}$  در گستره موقعیت سنگ‌های بازالتی قرار می‌گیرند (شکل ۱۷- الف و ب). این سنگ‌ها معادل سیل و دایک‌های دولریت-دیاباز در ستون چین‌شناسی در کمربند شهرضا-آباده است که احتمالاً سنگ‌های ماگمایی دیابازی می‌تواند بیانگر منشأ اصلی تیتانیم چشمه‌سیاه شهرضا باشد (Hallberg, 1984, Winchester et al., 1977).

۳- بخش عمده مگنتیت‌ها در نمونه‌های شیل رسی به هماتیت یا گوتیت تبدیل شده است. برخی مگنتیت‌های تشخیص داده شده که درصد آهن آنها در تحلیل نقطه‌ای میکروپروب بسیار کم بوده احتمالاً تیتانومگنتیت است. آزمایش‌های

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های هوازدگی در نمونه‌های مربوط به منطقه چشمه‌سیاه شهرضا (مقادیر نظری شاخص‌ها برای سنگ سالم و هوازده از منابع مربوط به جدول ۲ اقتباس شده‌اند)

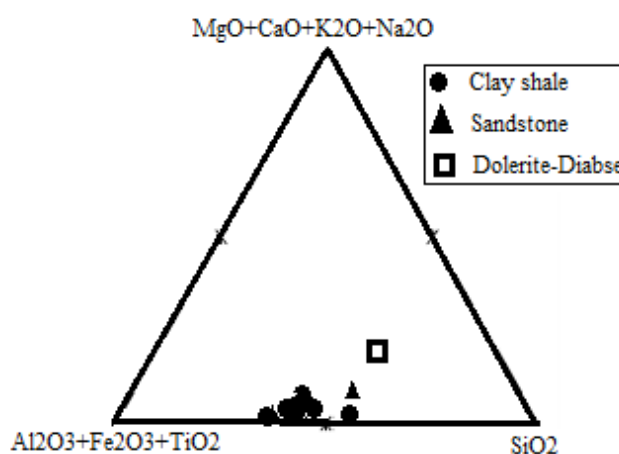
Abbreviation Name		R	CWI	SF	CIW	STI
Optimum fresh value		$\geq 5$	$< 50$	$\geq 4$	$\leq 50$	$> 70$
Optimum weathered value		0-5	50-100	$< 4$	50-100	0-70
Sample No.	Unit Name					
2	Clay shale	2/63	53/98	1/39	92/66	53/51
3	Clay shale	1/62	58/92	1/37	94/07	50/22
7	Clay shale	1/81	53/33	1/59	93/46	50/61
11	Clay shale	1/75	51/51	2/41	94/31	51/24
17	Clay shale	1/66	61/30	1/33	96/25	50/73
21	Clay shale	1/91	60/13	1/20	93/80	42/62
25	Clay shale	1/95	55/77	1/22	92/72	51/96
26	Clay shale	1/66	53/83	2/02	96/35	54/52
30	Dolerite- Diabase	3/85	26/43	3/96	49/73	72/31



شکل ۱۸- پراکنندگی نمونه‌های سنگ میزبان کانی‌سازی در نمودار سه متغیره  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$  برای تعیین فرایندهای هوازدگی (Sueoka, 1988)

جدول ۵- کانی‌های شناسایی شده کانسار تیتانیم چشمه سیاه با استفاده از پراش پرتو ایکس (XRD) به همراه موقعیت جغرافیایی

شماره نمونه	کانی‌های تشکیل دهنده	مختصات جغرافیایی (WGS_1984_UTM_Zone_39N)	
		۶۰۶۳۱۰	۳۵۲۸۴۳۸
Ch-۵	الونیت + کانولینیت + کوارتز + آناز	۶۰۶۲۵۶	۳۵۲۸۶۳۵
Ch-۹	همانیت + کانولینیت + آناز	۶۰۶۱۶۸	۳۵۲۸۶۸۱
Ch-۱۱	کانولینیت + آناز + کوارتز + جاروسیت + روتیل + ژپس + مونت موریلونیت + فلدسپار	۶۰۶۱۲۴	۳۵۲۸۸۳۲
Ch-۲۱	آناز + کانولینیت + همانیت + ناتروجاروسیت + ژپس + فلدسپار + مگنتیت	۶۰۵۹۹۱	۳۵۲۸۹۹۸
Ch-۲۹	آناز + کانولینیت + ناتروالونیت + گوئیت + کوارتز + ژپس + فلدسپار		



شکل ۱۹- روند کلی تغییرات عناصر اصلی در طی فرایند لاتریتی شدن سنگ منشأ به شیل رسی

ern Finland", *International Journal of mineral processing* 57, P.153-165.

Craig J., Vaughan D.J., 1981, "Ore microscopy and ore petrography", *John Wiley & Sons*, P.406.

Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1992, "An introduction to the rock forming minerals", *Longman*, P.528.

De Jayawardena U.S., Izawa E., 1994, "A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: a study from Sri Lanka", *Engineering Geology* 36, P.303-310.

Hallberg J.A., 1984, "A geochemical aid to igneous rocks identification in deeply weathered terrain", *Journal of Geochemical Exploration* 20, P.1-8.

Harnois L., 1988, "The C.I.W. index: a new chemical index of weathering", *Sedimentary Geology* 23, P.1-101.

Hill I. G., Worden R.H.G., Meighan I.G., 2000, "Geochemical evolution of a paleolaterite: the interbasaltic formation, Northern Ireland", *Chemical Geology* 166, P.65-84.

Ineson P.R., 1989, "Introduction to practical ore microscopy", *Longman*, P.181.

Iranian-Japanese Research Group, 1980, "The Permian and the Lower Triassic system", *Memories of the Faculty of Science, Kyoto University, Series of Geol. & Mineral* XLVII, No. 2, P. 61-133.

Jenny, H., 1941, "Factors of Soil Formation", *New York, London, McGraw-Hill Book Company*, P.281.

## مراجع

جعفریان م، ۱۹۹۱، "چینه‌شناسی طبقات پرمین و تریاس شهرضا-آباده-همبست" گزارش گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان (گزارش داخلی).

دانائی م. م، ۱۳۵۳، "کانی‌شناسی یا شناخت مواد معدنی جلد اول (غیر سیلیکات‌ها)" انتشارات دانشگاه مشهد، ۴۴۲ صفحه.

سازمان جغرافیایی و کارتوگرافی گیتاشناسی، ۱۳۸۱، "اطلس راه‌های ایران" مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰.

مهدیلو ا. و ایران‌نژاد م، ۱۳۸۳، "فرآوری کانسنگ تیتانیم قره‌آغاج ارومیه" اولین کنفرانس مهندسی معدن ایران؛ دانشگاه تربیت مدرس، صفحات ۱۲۴۷-۱۲۶۱.

"نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ سمیرم"، وزارت نفت.

Baghbani D., 1993, "The Permian sequence in the Abadeh region, Central Iran", *Contribution to Eurasian geology, University of South Carolina, USA, New series 9B*, P.7-22.

Braun J.J., Pagel M., Herbillon A., Rosin C., 1993, "Mobilization and redistribution of REEs and Th in a syenitic lateritic profile-a mass balance study", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57, P.4419-4434.

Chernet, T, 1999, "Mineralogical and textural Constraints on mineral processing of the koivusaarenneva ilmenite ore, west-

- Kretz R., 1983**, "Symbols for rock-forming minerals", *American Mineralogist* 68 ,P.277-299.
- Kurtz A.C., Derry L.A., Chadwick O.A., 2000**, "Refractory element mobility in volcanic soils", *Geology* 28, P.683-686.
- Nesbitt H.W., Wilson R.E., 1992**, "Resent chemical weathering basalts", *American. Journal of Earth Science* 292, P.740-777.
- Ruxton B.P,1968**, "Measures of the degree of chemical weathering of rocks", *Geology* 76 , P.518-527.
- Schellmann W., 1983**, "A new definition of laterite", *Natural Resources and evelopment* 18, P.7-21.
- Sueoka T., 1988**, "Identification and classification of granitic residual soils using chemical weathering index", *Second International Conference on Geomechanics in Tropical Soils, Singapore*, P.5-61.
- Taraz, H., 1974**, "Geology of Surmaq-Deh Bid area, Abadeh region, Central Iran", *Geological Survey of Iran* 37, P.148.
- Winchester J.A., Floyd P.A. ,1977**, "Geochemical discrimination of diferent magma series and their diferentiation products using immobile elements", *Chemical Geology* 20, P.325-343.

Archive of SID

