



## کانی‌شناسی، زمین‌شیمی، منشأ و مصرف صنعتی سیلیس منطقه عارفی، جنوب مشهد

محمدحسن کریم‌پور<sup>۱\*</sup>، آزاده ملکزاده سفارودی<sup>۱</sup> و سعید سعادت<sup>۲</sup>

(۱) گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(۲) دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، گروه زمین‌شناسی، مشهد، ایران

دریافت: ۱۳۹۳/۲/۱، پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۱

### چکیده

کنگلومرای کوارتزار عارفی (با سن ژوارسیک میانی) در زون ساختاری بینالود واقع شده است. این واحد دارای روند شمال غربی- جنوب شرقی است و در ۲۵ کیلومتری جنوب مشهد رخنمون دارد. بیش از ۹۷ درصد کنگلومرا از انواع مختلف کوارتز در قالب کوارتزهای مونوکریستالین، پلی کریستالین و به مقدار خیلی کمتر خرده‌سنگ از نوع چرت، کوارتزیت و یا میکا شیست تشکیل شده است. کمتر از ۳ درصد دیگر شامل فلدسپات، میکا، کلریت، هورنبلند، تورمالین، زیرکن، اسفن و کانی اوپاک است. سیمان از نوع سیلیسی است.

مطالعه سیالات درگیر در کوارتزهای مونوکریستالین و پلی کریستالین نشان‌دهنده حضور سیالات سه فاز LVS حاوی نمک طعام است. دمای همگن شدن آنها بین ۴۸۴ تا بیش از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین دمای ۵۵۹ درجه سانتی‌گراد و شوری بین ۴۹/۶ تا ۷۲/۱ درصد NaCl با میانگین ۶۱/۲ درصد می‌باشد که مؤید ماهیت ماگمایی آنهاست. دامنه دمای همگن شدن در سیالات درگیر دوفازی LV در کوارتز دگرگونی بین ۲۸۷ تا ۳۶۵ درجه سانتی‌گراد با میانگین دمای ۳۱۸ درجه سانتی‌گراد است. مهمترین منشأ کوارتزهای موجود در کنگلومرا، رگه‌های کوارتز در بخش فوقانی توده‌های گرانیتی - پگماتیتی (تریاس فوقانی) محدوده خواجه مراد و رگه‌های کوارتز تشکیل شده در زمان دگرگونی ناحیه‌ای است.

بر پایه تجزیه ژئوشیمیایی ۹۳ نمونه برداشت شده از سطح (روش کانالی) و حفاری پودری از عمق، مقدار  $\text{SiO}_2$  عمدتاً بیش از ۹۸ درصد، مقدار TFeO کمتر از ۰/۴۲ درصد و  $\text{TiO}_2$  کمتر از ۰/۱۶ درصد است. میزان ذخیره قطعی بیش از ۵۰ میلیون تن است. با انجام آزمایش‌های مغناطیسی خشک مقدار TFeO به ۰/۰۳ درصد و  $\text{TiO}_2$  به ۰/۰۲ درصد نیز کاهش یافته است. ذخیره سیلیس عارفی از نوع سیلیس درجه یک محسوب شده و برای انواع مختلف صنایع سرامیک می‌تواند استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: کنگلومرای غنی از سیلیس، کانی‌شناسی، ژئوشیمی، منشأ کوارتز، مصارف صنعتی، منطقه عارفی

### مقدمه

کیفیت خاصی داشته باشد. ترکیب شیمیایی، ساختمان کانی‌شناسی و خواص فیزیکی سیلیس، تعیین‌کننده کیفیت و موارد مصرف آن در هر یک از صنایع مذکور می‌باشد. در صورتی که درصد اکسیدهای دیگر غیر از  $\text{SiO}_2$  از حدود معینی تجاوز کند، کاربرد آن را در صنایع مختلف محدود و یا غیرممکن می‌سازد. مهمترین اکسیدهای مزاحم، TFeO،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{TiO}_2$  هستند.

منطقه عارفی در فاصله حدود ۲۵ کیلومتری جنوب مشهد و در محدوده بین طولهای جغرافیایی ۵۹°۲۸'۴۵" تا

تنوع اشکال سیلیس و خواص ویژه آن از قبیل سختی بالا، بی‌اثر بودن از لحاظ شیمیایی و نقطه ذوب بالا باعث شده است که کاربرد وسیعی در صنایع مختلف داشته باشد. یک عامل اصلی و مهم در به کارگیری سیلیس مقدار  $\text{SiO}_2$  است. در نتیجه سیلیس در صنایع مختلفی نظیر شیشه‌سازی، سرامیک، بلور و کریستال، ریخته‌گری، تولید بتن سبک، سندبلاست، دیرگدازها، تصفیه مایعات، تولید سیلیکات سدیم و غیره مصرف می‌شود. سیلیس مصرفی در هر یک از صنایع باید

## روش مطالعه

۱- تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ که در قالب برداشت ۳۰ پروفیل عمود بر امتداد لایه‌بندی انجام شد. در هر پروفیل ابتدا به تغییرات لیتولوژیکی منطقه توجه شد. پس از آن در بخشهایی که پروفیل وارد واحد اصلی مدنظر یعنی کنگلومرای کوارتزار می‌شد، نکاتی مانند اندازه دانه‌های کوارتز، درصد سیمان، فراوانی کوارتزهای سفید و خاکستری، درصد اکسید آهن، درصد دیگر پبلهای کنگلومرا و شیب و امتداد لایه برداشت شده است.

۲- مطالعه ۶۵ مقطع نازک از واحد کنگلومرای کوارتزار.

۳- آماده‌سازی و تجزیه ۹۳ نمونه ژئوشیمیایی برداشت‌شده از محل ترانشه‌ها و چالهای اکتشافی به روش XRF برای ارزیابی میزان اکسیدهای سیلیسیم، آهن، تیتان و کلسیم. به منظور بررسی تغییرات ژئوشیمیایی عناصر مهم مانند اکسید سیلیس، اکسید آهن، اکسید تیتان و اکسید کلسیم در کنگلومرای کوارتزار، ابتدا مکانهایی عمود بر امتداد لایه‌بندی کنگلومرا برای برداشت نمونه انتخاب شد. انتخاب محل نمونه‌برداری با توجه به ضخامت لایه، تغییرات مقدار و اندازه پبلهای کوارتز و مقدار اکسید آهن صورت گرفت. روش نمونه‌برداری ترانشه‌ای بوده است. در این مرحله ۶۳ ترانشه با ابعاد میانگین حدود ۷ متر × ۱۰ سانتی‌متر × ۱۰ سانتی‌متر تعریف شد. طول ترانشه‌ها براساس تغییرات در مقدار و اندازه کوارتز و مقدار اکسید آهن در نظر گرفته شدند. از هر ترانشه نمونه‌هایی با وزن حدود ۳۰ تا ۴۰ کیلوگرم برای تجزیه ژئوشیمیایی جمع‌آوری شد. ابتدا کل هر نمونه خردایش شد و سپس بعد از همگن نمودن، با دقت تقسیم شده و مقدار ۱۰۰ گرم نمونه با استفاده از آسیاب با آلیاژ تنگستن کاربرد نمایش شد. آسیاب با جنس تنگستن کاربرد برای نمایش نمونه‌هایی که هدف اصلی تجزیه اکسید سیلیس و اکسید آهن است، ضروری می‌باشد تا از ورود هرگونه آلودگی عناصر سیلیسیم و آهن به داخل نمونه خودداری شود. دستگاه XRF مدل فیلیپس و متعلق به آزمایشگاه گروه کارخانجات چینی مقصود بوده است.

۴- آزمایش فرآوری نمونه‌ها در آزمایشگاه شرکت مهندسی دانش فراوران.

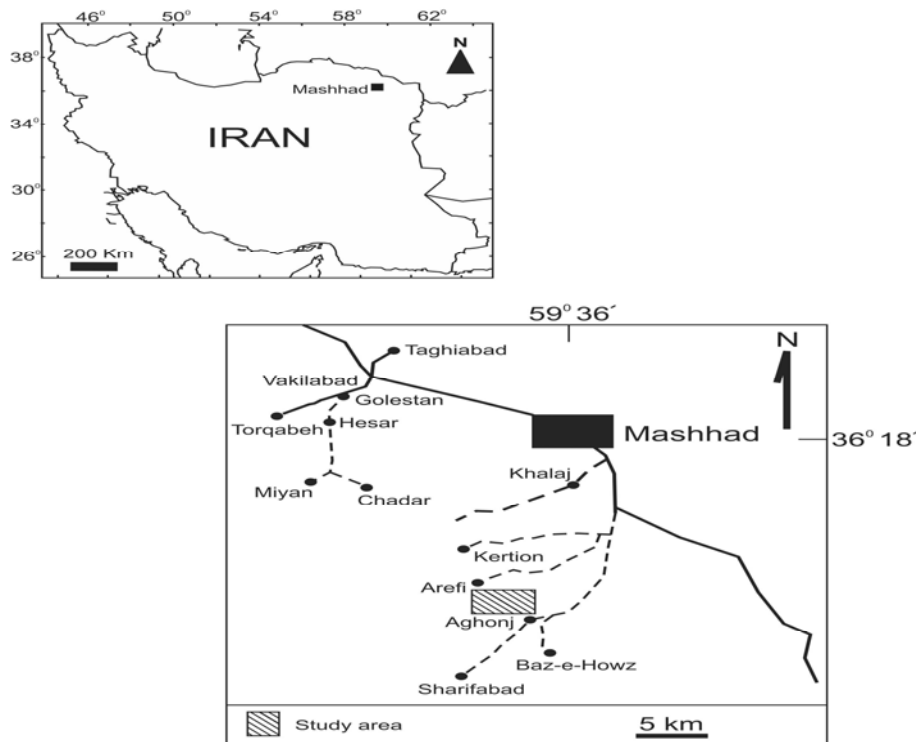
۵- مطالعه سیالات درگیر بر روی ۴ مقطع دوبرصیقل (ویفر) از پبلهای کوارتز. آزمایشهای مربوطه با استفاده از یک دستگاه سردکننده و گرم‌کننده ساخت شرکت لینکام مدل

۳۲°۳۲′۵۹″ شرقی و عرضهای جغرافیایی ۳۶°۰۴′۵۲″ تا ۳۶°۰۷′۵۲″ شمالی واقع شده است. این محدوده در حدفاصل روستاهای عارفی و آغنج قرار دارد (شکل ۱). از لحاظ تقسیمات ساختاری این منطقه جزو زون بینالود محسوب می‌شود. درون یک حوضه تکتونیک باریک با روند NW-SE در جنوب بینالود، کنگلومرا، شیل و سیلت‌استون دیده می‌شود. کنگلومرای قاعده در قسمت شمالی حوضه وجود دارد و در جهت SW به سیلت‌استون و شیل تغییر می‌یابد. این کنگلومرا شامل پبل‌ها و قلووه‌هایی از متافلیش، تونالیت، گرانودیوریت، فلدسپات مونوزوگرانیت پورفیری، ماسه سنگ، سیلت‌استون و شیل است. افقهای کمی از زغال درون شیل‌ها دیده می‌شود. به طرف قسمتهای فوقانی، کنگلومرای با پبلهای کوارتز شیری گرد شده مشاهده می‌گردد که در جهت SW نزدیک توده لوکوگرانیتی، پبل‌های کوارتز افزایش می‌یابد. نزدیک روستای عارفی کنگلومرای کوارتزی با ۹۰ درصد کوارتز شیری گردشده مشاهده می‌گردد. هاشمی (Hashemi, 2004) معتقد است که کنگلومراهای این ناحیه از نوع کنگلومرای ارتوکوارتزی و پلی میکتیک و ماسه‌سنگها نیز عمدتاً کوارتز و کوارتزولیتیک می‌باشند که نشان می‌دهد این رسوبات حاصل کوه‌زایی هستند که از کمربندهای چین‌خورده - تراستی شده و کمربندهای درزه‌ای شده‌ای که طی برخورد صفحه ایران و توران ایجاد شده‌اند، منشأ گرفته و در یک حوضه فورلند تشکیل شده‌اند. فسیلهای گیاهی که به‌طور کلی در این رسوبات پیدا شده سن لیاس - دوگر (ژوراسیک) را برای آنها تداعی می‌کند (Khatonie, 2000).

با توجه به گستردگی استفاده از منابع سیلیس در صنایع مختلف، اکتشاف و مطالعه تفصیلی این‌گونه ذخایر، آن هم در نزدیکی شهرهای بزرگ، گام مهمی در جهت رونق صنایع معدنی و صنعتی وابسته می‌باشد. هدف از این مقاله بررسی دقیق کانی‌شناسی کنگلومرای عارفی با تأکید ویژه بر نوع، اندازه، درصد و آغشتگی پبلهای کوارتز با اکسیدهای آهن، ژئوشیمی با تأکید ویژه بر مقدار سیلیس و عناصر مزاحم، منشأ دانه‌های کوارتز با کمک شواهد زمین‌شناسی و نیز مطالعه سیالات درگیر و بررسی مصرف صنعتی آن با نگاه ویژه برای ساخت چینی‌آلات و سرامیک، به‌عنوان یکی از منابع غنی از سیلیس نزدیک به مشهد بوده است.

استفاده از برنامه HOKIEFLINCS-H<sub>2</sub>O-NACL محاسبه شده است (Steele-MacInnis et al., 2012; Lecumberri-Sunchez et al., 2012). هیستوگرام‌های مناسب در نرم‌افزار SPSS ترسیم شد.

THM 600 در دانشگاه فردوسی مشهد صورت گرفته است. دقت کار دستگاه در مرحله سرد و گرم کردن  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  و محدوده حرارتی دستگاه بین (-۱۹۰) تا (+۶۰۰) درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مقدار شوری و دانسیته سیالات درگیر با



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راههای دسترسی به محدوده عارفی در شمال شرق ایران

Fig. 1. Location and access roads to the Arefi area, NE Iran

بروزد دارد که در واقع زون درز محسوب می‌شوند (شکل ۲). یکنواختی لایه‌ها و وجود میان‌لایه‌های چرتی در این واحد بیانگر پلاژیک بودن این واحد رسوبی و رسوب‌گذاری در پهنه‌های کف اقیانوسی است. متاکنگلومرای کربناته گسترش کمتری داشته و عدسی‌شکل و توده‌ای هستند که کمتر از ده متر ضخامت و چند ده متر طول دارند. در این سنگها شن و قله‌سنگهای کربناته در زمینه دانه‌ریز کربناته جای گرفته‌اند. مرز تحتانی و فوقانی آنها با اسلیت و فیلیت تدریجی است. در تعدادی از آنها قطعات کرینوئید دیده می‌شود که بیانگر محیط دریایی کم‌عمق برای رسوب‌گذاری اولیه است. توف و لایپلی توف‌های دگرگون شده گسترش کمی دارند و حاصل فعالیت انفجاری در محیط‌های خشکی و کم‌عمق دریایی هستند (Taheri and Ghasemi, 1993). همراهی این واحد با بقیه مجموعه، بیانگر وجود فعالیت آتشفشانی بوده و احتمالاً حاصل

#### زمین‌شناسی

منطقه مورد مطالعه در گوشه جنوب غربی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ مشهد (Taheri and Ghasemi, 1993) واقع شده است (شکل ۲). براساس این نقشه قدیمی‌ترین واحد رخنمون یافته در این ناحیه سنگ آهک و آهک دولومیتی سازند بهرام به سن دونین می‌باشد که در بعضی نقاط دارای کرینوئید فراوان است. این واحد در جنوب روستای عارفی و غرب روستای آغنج بروزد دارد. در کلیه این نواحی، سطح تماس این واحد با دیگر واحدها گسله و عمدتاً راندگی است (شکل ۲) (Taheri and Ghasemi, 1993).

مجموعه توریداتی دگرگون شده پرمین شامل اسلیت، فیلیت، مرمر، کالک شیست، کنگلومرای دگرگون شده، اولیستولیت، توف و لایپلی توف دگرگون شده و مقادیر اندکی چرت و گدازه ولکانیکی حفره‌دار در شمال شرقی ناحیه مورد مطالعه

تقریباً تمامی گسل‌های راندگی روند شمال غربی - جنوب شرقی داشته و سوی حرکت در تمامی آنها از شمال، شمال شرق به سمت جنوب، جنوب غرب است. این راندگیها بیانگر کوتاه شدگی در راستای شمال شرق - جنوب غرب هستند که تحت تأثیر یک میدان استرس انقباضی ایجاد شده و به ایجاد گسل‌های امتدادلغز و شکستگیهای کششی نیز منجر شده است. عامل این استرس انقباضی را می‌توان به بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس و تصادم قطعات لیتوسفری توران و ایران مرتبط دانست (Alavi, 1991).

نقشه زمین‌شناسی محدوده اکتشافی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ تهیه و در شکل ۳ نشان داده شده است. قدیمی‌ترین واحد منطقه، سنگ‌آهک است که در جنوب محدوده رخنمون دارد (شکل ۳). بقیه پوشش زمین‌شناسی منطقه را می‌توان در دو واحد شیل - ماسه سنگ - کنگلومرای ژوراسیک عمدتاً در نیمه غربی و کوارتز کنگلومرای عارفی در نیمه شرقی تقسیم کرد (شکل ۳). واحد شیل - ماسه سنگ - کنگلومرای غرب محدوده مورفولوژی تپه ماهوری دارد و بیرون‌زدگیهایی از کنگلومرای کوارتزار به صورت بین‌لایه‌ای در آن دیده می‌شود (شکل ۴ - A). در حالی که کوارتز کنگلومرای عارفی مورفولوژی نسبتاً خشن دارد و بخش عمده آن از کوارتزهای نسبتاً گردشده تشکیل شده است. مقدار کوارتز، درصد سیمان و مقدار اکسید آهن در نقاط مختلف متفاوت است (شکل‌های ۴-B، C و D). امتداد لایه‌بندی کنگلومرای عارفی عمدتاً حدود ۲۰ تا ۷۰ درجه شمالی شرقی - جنوب غربی و شیب آن غالباً بین ۱۰ تا ۴۰ درجه به سمت شمال غربی یا جنوب شرقی متغیر است. کوارتزار سفید عارفی که بیش از ۹۰ درصد پیل‌های تشکیل دهنده آن را دانه‌های کوارتز با گردشگی خوب تا متوسط و ۱۰ درصد آن را خرده‌سنگ‌های دگرگونی و چرت تشکیل می‌دهد، هدف اصلی این مقاله است. سیمان این واحد سیلیسی و طبقه بندی آن متوسط تا ضخیم است (شکل ۴ - B).

#### سنگ‌شناسی

کنگلومرای عارفی براساس طبقه‌بندی بافتی سنگ‌های رسوبی آواری (Blair and Macpherson, 1999) از نوع کنگلومرا (G) (دانه‌های ماسه‌ای کمتر از ۱۰ درصد)، کنگلومرای ماسه‌ای (sG) (دانه‌های ماسه بین ۲۰ تا ۷۰ درصد) و

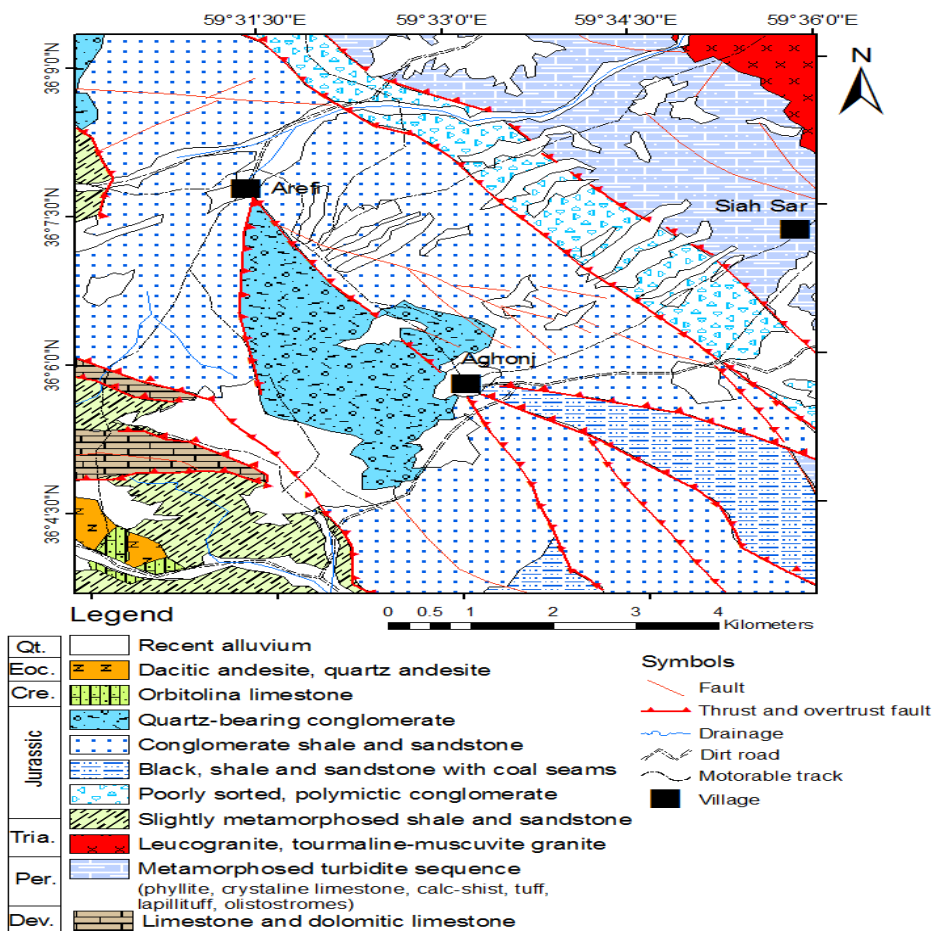
فوران در قوس آتشفشانی است (Alavi, 1991). بخشی از توده‌های گرانیتی نوع S (سری ایلمنیت - احیایی) تریاس زون بینالود که حاصل ذوب‌بخشی پوسته قاره‌ای بوده و در اثر برخورد دو صفحه ایران و توران در یک زون برخوردی تشکیل شده و در سنگ‌های رسوبی - دگرگونی نفوذ نموده‌اند، در شمال شرقی منطقه دیده می‌شود (شکل ۲) (Karimpour et al., 2009; Karimpour et al., 2010). شیل‌های تیره‌رنگ و ماسه سنگ سبز تیره تریاس با دگرگونی خفیف در جنوب غربی ناحیه رخنمون دارد (شکل ۲). بر روی این مجموعه، کنگلومرای کشف‌رود با دگرشیبی قرار دارد. این واحد از نظر رخساره سنگی مشابه سازند میانکوهی است که در منطقه آق دربند معرفی شده است (Taheri and Ghasemi, 1993). کنگلومرای ژوراسیک با روند شمال غربی - جنوب شرقی در شمال شرقی محدوده قرار دارد که عضو قاعده‌ای ژوراسیک محسوب می‌شود (شکل ۲). مرز آن با واحدهای مجاور گسله و از نوع راندگی است. این کنگلومرا با ویژگیهایی مانند عدم چورشدگی و گردشگی و نیز دارابودن زمینه‌ای از جنس رس که شنهای تشکیل دهنده آن اغلب از خرده‌های گرانیتوئیدی، سنگ‌های الترامافیک و مافیک، ماسه سنگ، فیلیت و به مقدار کم آهک است، مشخص می‌شود (Taheri and Ghasemi, 1993).

شیل و ماسه‌سنگ تیره ژوراسیک با رگه‌های زغالی نسبتاً فراوان و آثار فسیل گیاهی در جنوب شرقی محدوده رخنمون دارد (شکل ۲). تناوب شیل تیره و کنگلومرای کوارتزار که گاهی اوقات میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی دارد و به‌طور تدریجی به کنگلومرای کوارتزار عارفی تبدیل می‌شود، بخش اعظم منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است و بخشی از محدوده مورد مطالعه در این واحد قرار می‌گیرد (شکل ۲). سنگ آهک اوربیتولین‌دار کرتاسه زیرین متوسط‌لایه تا نازک‌لایه که به‌صورت تدریجی بر روی واحد کنگلومرای کرتاسه قرار گرفته است، رخنمون اندکی در جنوب غربی ناحیه دارد. رخنمون‌های کوچکی از واحدهای آتشفشانی داسیت - آندزیت و کوارتز آندزیت در جنوب غربی ناحیه نیز دیده می‌شود (شکل ۲) (Taheri and Ghasemi, 1993).

منطقه مورد مطالعه از لحاظ تکتونیک در ناحیه زون درز قرار دارد و به‌طور کلی گسل‌های راندگی و صفحات رورانده، عمده‌ترین ساختمانهای زمین‌شناسی در منطقه هستند.

ارتوکنگلومرا محسوب می‌شود، زیرا متعلق به محیط رودخانه‌ای پرانرژی بوده و دانه‌های درشت و ریز با تراکم بالا توسط یک سیمان سیلیسی به یکدیگر متصل شده‌اند (Sahabi, 1996). از آنجایی که این واحد از دانه‌ها و خرده‌سنگهای سخت و مقاوم در برابر هوازدگی و فرسایش نظیر کوارتز، کوارتزیست و چرت تشکیل شده و از گردشگری خوبی برخوردار بوده و اندازه آنها از چند سانتی‌متر تجاوز نمی‌کند، می‌تواند در گروه کنگلومراهای ارتوکوارتزیستی قرار بگیرد.

کنگلومرای دارای اندکی ماسه ((s)G) (دانه‌های ماسه بین ۱۰ تا ۲۰ درصد) می‌باشد. براساس طبقه‌بندی بافتی سنگهای رسوبی آواری (Pettijohn, 1975) از نوع کنگلومرای پلی میکتیک یا چند منشایی است، زیرا از دانه‌های مختلف تشکیل شده است. از آنجایی که ذرات تشکیل‌دهنده کنگلومرا در اثر تخریب سنگهای قدیمی و در خارج حوضه رسوبی تشکیل شده‌اند و عمدتاً ذرات تخریبی آواری با منشأ قاره‌ای اسکلت این سنگها را تشکیل می‌دهد، طبق طبقه‌بندی (Pettijohn, 1975) می‌توان آنها را از نوع برون حوضه‌ای دانست. این کنگلومرای برون حوضه‌ای خود از نوع کنگلومراهای عادی یا



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ناحیه‌ای منطقه عارفی (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ مشهد) (Taheri and Ghasemi, 1993)

**Fig. 2.** Regional geologic map of the Arefi area (according to the geologic map of Mashhad in scale 1:100,000) (Taheri and Ghasemi, 1993)

رخساره‌ها را به سه گروه گراولی، ماسه‌ای و گلی تقسیم‌بندی نمود. رخساره‌های گراولی از ضخامت بسیار زیادی در منطقه عارفی برخوردار است. طبقات توده‌ای، لایه‌بندی افقی،

هاشمی (Hashemi, 2004) رخساره‌های سنگی متعددی را براساس اختصاصات بافتی و ساختمانهای رسوبی شناسایی کرد. وی براساس طبقه‌بندی (Miall, 1996; Miall, 2000)

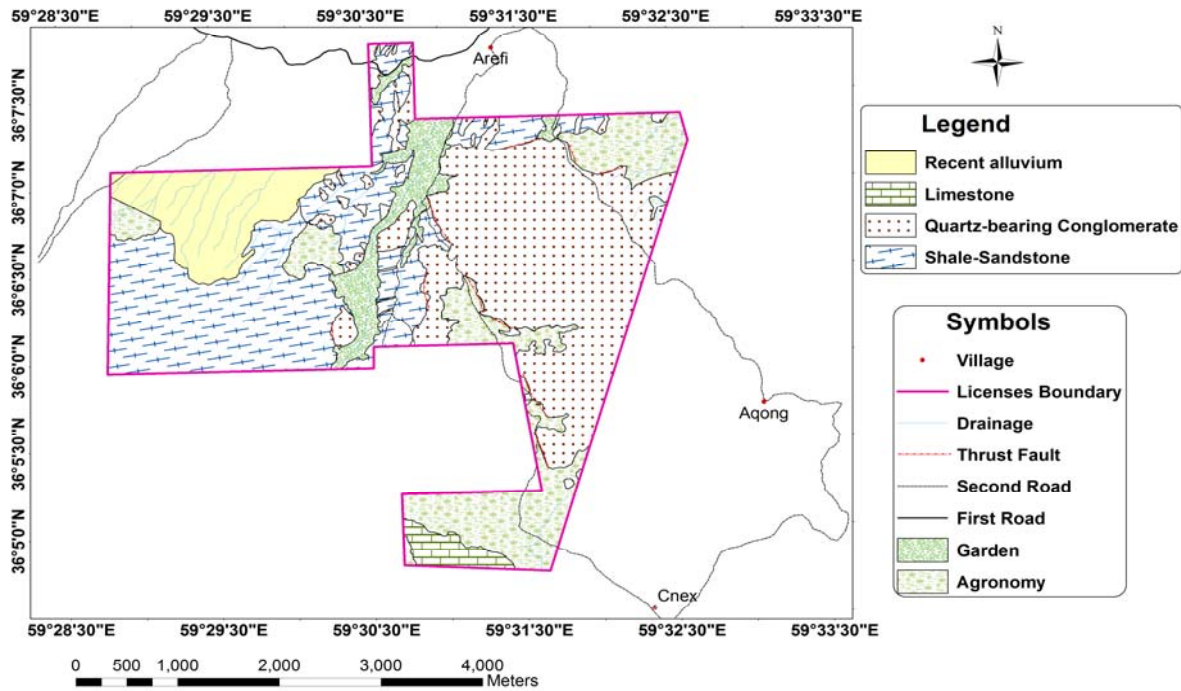
(1980)، کوارتزهای دگرگونی می‌تواند شامل کوارتزهای دگرگونی محصول تبلور مجدد، کوارتزهای شیسستوز و کوارتزهای دگرگونی کشیده شده باشد که البته نوع اول فراوانتر است. کوارتزهای دگرگونی محصول تبلور مجدد، پلی‌کریستالین بوده به طوری که کریستالها به صورت یک دسته موازی‌کهایی با ابعاد یکسان و با کناره‌های مسطح تا نیمه مژرس و گاهی مژرس مشاهده می‌شوند. خاموشی آنها مستقیم و گاهی انکلوژیونهایی از میکا و واکوئول در آنها مشاهده می‌شود. به دلیل استحکام پایین، احتمال خرد شدن آنها بالاست، به طوری که در خیلی قسمت‌ها شکستگی و گاهی خردشدگی مشاهده می‌گردد. این نوع کوارتزها تحت فشار زیاد، ذوب و مجدداً تبلور یافته‌اند و احتمالاً از سنگهای شدیداً دگرگون شده مانند شیسست منشأ گرفته‌اند. کوارتزهای دگرگونی شیسستوز نیز پلی‌کریستالین بوده و کریستالها به صورت کشیده و اضلاع تقریباً موازی در بین ورقه‌های میکا رشد کرده‌اند. خاموشی آنها مستقیم و گاهی کمی موجی است. این نوع کوارتز احتمالاً در حین تشکیل تدریجی شیسست‌ها به وجود آمده‌اند و نهایتاً از آنها منشأ گرفته‌اند. کوارتزهای دگرگونی کشیده شده نیز پلی‌کریستالین هستند و کریستالها به طور طویل یا صفحه‌ای با کنتاکتهای به شدت مژرس در کنار هم قرار گرفته‌اند (شکلهای B-5 و C). خاموشی از نوع موجی ضعیف یا قوی و شامل انکلوژیونهایی از میکاست. این کوارتزها احتمالاً در اثر خرد شدن سنگهای کوارتزار قدیمی مثل ماسه‌سنگ، گرانیت و شیسست حاصل شده‌اند (Sahabi, 1996).

کوارتزهای پلوتونیک با شکل هندسی نامنظم و با خاموشی مستقیم تا کمی موجی جزو فراوانترین کوارتزهای آذرین این واحد هستند. این کوارتزها می‌توانند از گرانیت‌های منطقه منشأ گرفته باشند. کوارتزهای هیدروترمال یا رگه‌ای نیز اغلب به صورت دانه‌های درشت با خاموشی مستقیم و گاهی کمی موجی و مقدار فراوان واکوئولهای آب که منظره سفید شیری رنگی به آنها داده است، دیده می‌شوند. اینها از رگه‌های کوارتز داخل واحدهای گرانیتی یا پگماتیت‌ها منشأ گرفته‌اند. مقدار کمی کوارتز میکروکریستالین متشکل از بلورهای ریز کوارتز و به فرم مرکب مشاهده می‌گردد که می‌تواند از ماسه سنگهای ریز دانه یا کوارتزیت منشأ گرفته باشد.

طبقه‌بندی مورب و طبقه‌بندی تدریجی از جمله ساختمانهای رسوبی مهم موجود در این نوع رخساره است (Miall, 2000). معمولاً طبقات توده‌ای در شرایط جریان آشفته و مقدار بالای بار رسوبی تشکیل شده‌اند (Mousavi Harami, 1995). رخساره‌های گراولی موجود در کنگلومرای عارفی شامل رخساره‌های سنگی Gp و Gh, Gmm, Gmg, Gcm است (Hashemi, 2004). رخساره‌های ماسه‌ای از ضخامت کمتری برخوردار است. این رخساره‌ها معمولاً تحت جریانهای کششی تشکیل شده‌اند و ساختمانهای رسوبی شامل طبقه‌بندی مورب مسطح، طبقه‌بندی مورب عدسی شکل، طبقه‌بندی تدریجی، طبقات توده‌ای، لایه‌بندی افقی، لامیناسیون مسطح، ریپل مارک و حفرات کنده شده و پر شده در آنها دیده می‌شود (Miall, 2000). رخساره‌های ماسه‌ای موجود در این واحد شامل رخساره‌های سنگی Se و Sl, St, Sp, Sr, Sm, Sh است (Hashemi, 2004). رخساره گلی به مقدار بسیار ناچیز در منطقه عارفی دیده می‌شود. این رخساره دارای ساختمان رسوبی لایه‌بندی افقی نازک تا بسیار نازک و گاهی لامیناسیون مسطح است. رخساره سنگی FI تنها رخساره این نوع است که بسیار اندک دیده می‌شود (Hashemi, 2004).

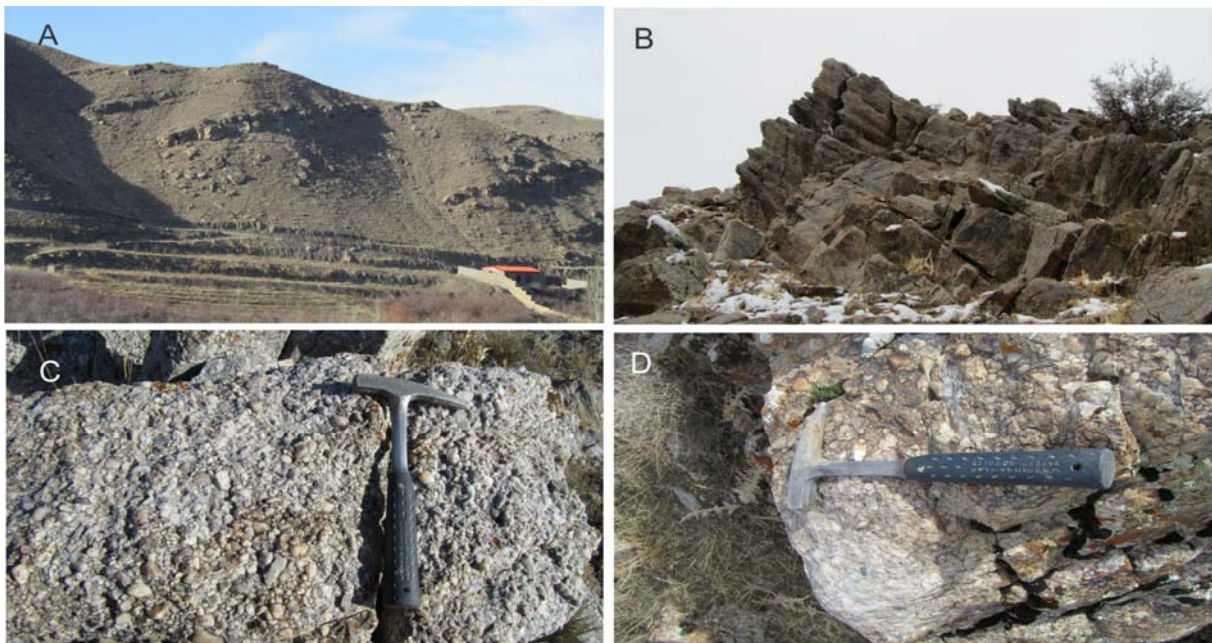
به طور کلی بیش از ۹۷ درصد تمام نمونه‌های مطالعه شده کنگلومرا از انواع مختلف کوارتز در قالب کوارتزهای مونوکریستالین (Qm)، پلی‌کریستالین (Qp) و به مقدار خیلی کمتر خرده‌سنگ رسوبی از نوع چرت و خرده‌سنگ دگرگونی از نوع کوارتزیت و یا میکا شیسست تشکیل شده است. کوارتز هم بخش اعظم قطعات را تشکیل می‌دهد و هم سیمان اصلی بین ذرات است. کمتر از ۳ درصد کانیهای دیگری مانند میکروکلین، ارتوکلاز، پلاژیوکلاز، مسکویت، بیوتیت، هورنبلند، کلریت، تورمالین، کانی اوپاک، زیرکن و اسفن همراه با سیمان اکسید آهن و به ندرت کربناته در نمونه‌ها دیده می‌شود.

**کوارتز:** در نمونه‌های کنگلومرا، مقدار کوارتزهای پلی‌کریستالین از مونوکریستالین بیشتر است و در مجموع بین ۵۵ تا ۹۰ درصد قطعات را در بخشهای مختلف تشکیل می‌دهند. گردشگی آنها عمدتاً بالا تا متوسط بوده و اندازه آنها از ۰/۱ میلی‌متر تا ۵ سانتی‌متر متغیر است (شکلهای ۵- A, B, C, D, E و F). دانه‌های کوارتز برحسب منشأ، اغلب از نوع کوارتزهای دگرگونی، کوارتزهای پلوتونیک و Folk کمتری کوارتزهای رسوبی است. براساس طبقه‌بندی (Folk,



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی محدوده عارفی

Fig. 3. Geologic map of the Arefi area



شکل ۴. A: واحد شیل و ماسه‌سنگ همراه با بیرون‌زدگی‌هایی از کنگلومرای کوارتزدار به صورت بین‌لایه‌ای (دید به غرب)، B: مورفولوژی خشن کنگلومرای عارفی همراه با طبقه‌بندی متوسط تا ضخیم لایه (دید به شمال شرقی)، C: گردشگری دانه‌ها در کنگلومرا غنی از کوارتز، D: کوارتز کمتر و درصد سیمان و اکسید آهن بیشتر در کنگلومرا.

Fig. 4. A: Shale and sandstone with intercalations of quartz-bearing conglomerate (looking W), B: Hard morphology of medium to thick-bedded Arefi conglomerate (looking NE), C: rounded grains in quartz-rich conglomerate, D: Low quartz associated with high Fe-oxide and cement in conglomerate

**خرده‌سنگها:** در نمونه‌های کنگلومرای عارفی عمدتاً خرده‌سنگهای رسوبی از نوع چرت و خرده‌سنگهای دگرگونی از نوع کوارتزیت و مسکویت شیست و به‌ندرت بیوتیت شیست دیده می‌شود (شکل‌های A-5, B, C و D). خرده‌سنگهای چرت عمدتاً از گردش‌دگی بالایی برخوردار هستند. مقدار خرده‌سنگها از ۱ تا ۴۰ درصد نمونه و با اندازه‌های ۰/۲ تا ۹ میلی‌متر در بخش‌های مختلف متغیر است. خرده‌سنگهای دگرگونی نیز بسیار فراوان‌تر هستند.

**سایر اجزا:** از دیگر کانیهای موجود در کنگلومرای عارفی می‌توان به فلدسپات، میکا، آمفیبول، کلریت، تورمالین، کانیهای اوپاک و غیره اشاره نمود که مقدار آنها در مجموع بسیار ناچیز است (کمتر از یک درصد با اندازه ۰/۱ تا حداکثر ۲ میلی‌متر). فلدسپات‌ها به دلیل مقاومت فیزیکی و شیمیایی کمتر نسبت به کوارتز به مقدار کمتری مشاهده می‌شوند. عمده فلدسپات در این واحد رسوبی میکروکلین (شکل E-5) و کمتر ارتوکلاز و پلاژیوکلاز تشخیص داده شد که می‌تواند از گرانیته‌ها منشأ گرفته باشد. از کانیهای خانواده میکا دو کانی مسکویت (شکل C-5) و بیوتیت کم آهن (با رنگ قهوه‌ای خیلی روشن در نور ppl) دیده می‌شود. به دلیل مقاومت بالای میکاها، گردش‌دگی در آنها کمتر دیده می‌شود ولی به دلیل قابلیت انعطاف‌پذیری، گاهی به‌صورت میکای خمیده بین دانه‌های دیگر مشاهده می‌گردد. میکاها هم به‌صورت قطعه جداگانه و هم داخل خرده‌سنگهای دگرگونی شیستی وجود دارند. کلریت بسیار ناچیز در برخی نمونه‌ها دیده شد که می‌تواند حاصل تجزیه کانیهای فرومنیزین باشد. هورنبلند (شکل F-5)، تورمالین، زیرکن، اسفن و کانیهای اپاک (مگنتیت و ایلمنیت) (حداکثر تا ۰/۵ درصد) نیز به مقدار ناچیز و البته متغیر در نمونه‌ها حضور دارد.

**سیمان:** سیمانی شدن یکی از فرآیندهای دیاژنز است که در کنار فرآیند فشردگی، سبب تبدیل رسوبات به سنگ می‌شود. نوع سیمان معمولاً توسط عواملی چون ترکیب ذرات تشکیل دهنده سنگ، ترکیب آب‌های درون حفره‌ای و شرایط فیزیکوشیمیایی محیط دیاژنز کنترل می‌گردد (Tucker, 2001). مقدار سیمان کنگلومرای مطالعه شده بین ۱ تا ۶ درصد کل نمونه‌ها در بخش‌های مختلف متغیر است. مهمترین سیمان کنگلومرای عارفی از نوع سیلیسی است. سیمان سیلیسی معمولاً به‌صورت رورسیدی در اطراف دانه‌های کوارتز

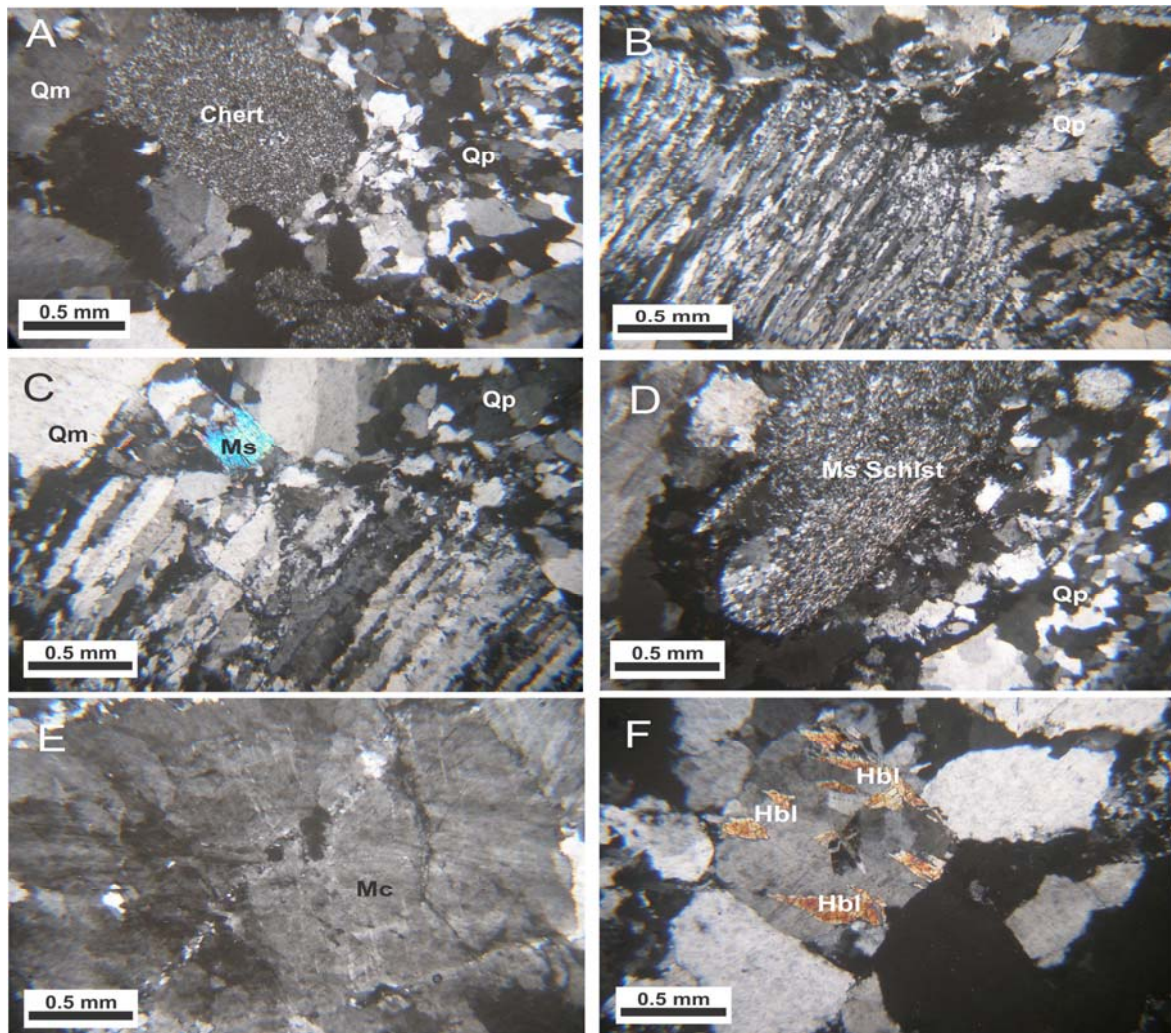
و به‌صورت پرکننده حفرات و درز و شکستگیها دیده می‌شود. از جمله عمده‌ترین منابع سیمان سیلیسی به ترتیب اهمیت در این واحد می‌توان به سیلیس آزاد شده از انحلال فشاری در کنتاکت بین دانه‌ها، سیلیس محلول در آبهای بین دانه‌ای حاصل از سایش دانه‌های کوارتز در حین حمل و نقل و انحلال آن در آب، سیلیس محلول در آبهای متئوریک حاصل از دگرسانی کانیهای سیلیکاته در زون هوازدگی، سیلیس آزادشده از دگرسانی فلدسپات و سیلیس آزاد شده از جانشینی کربناتها به جای سیلیکاتها اشاره نمود (Hashemi, 2004).

سیمان اکسید آهن بعضاً در فضای بین دانه‌ها، در درز و شکستگیها و در حاشیه دانه‌های کوارتز بین کمتر از ۰/۱ تا حداکثر ۳ درصد دیده می‌شود. خوشبختانه در درون دانه‌های کوارتز اکسید آهن وجود ندارد. آهن آزاد شده از هوازدگی سنگهای رسوبی و آذرین در سرمنشأ، به‌صورت محلول در آبهای بین ذره‌ای در یک محیط اکسیدان، سبب تشکیل این سیمان می‌گردد. مقداری اکسید آهن نیز در طی مراحل دیاژنز نهایی رسوبات در اثر دگرسانی کانیهای فرومنیزین تشکیل می‌شوند (Tucker, 2001). سیمان کربناته سومین سیمان از لحاظ فراوانی در کنگلومرای عارفی است. سیمان کربناته می‌تواند در اعماق کم در اثر تبخیر آب بین ذره‌ای، در اعماق بالا در اثر بالا رفتن درجه حرارت و pH محیط و به‌صورت جانشینی کلسیت به جای سیلیس و در زمان بالا آمدگی از آبهای جوی غنی از کربنات کلسیم منشأ گرفته باشد (Tucker, 2001). در منطقه عارفی به دلیل نبود خرده‌سنگ کربناته، رس‌دار و شیلی، منشأ خارج از حوضه داشته و حاصل از رسوب‌گذاری از محلولهای اشباع شده از یونهای کلسیم و بیکربنات ناشی از فشردگی و انحلال سنگهای آهنکی، رسی و شیلی مجاور می‌باشد (Hashemi, 2004).

#### ژئوشیمی

نتایج تجزیه کل نمونه‌های ژئوشیمیایی در شکل‌های ۶ تا ۹ ارائه شده و خلاصه آن به شرح زیر است:  
 اکسید سیلیسیم: مقدار  $SiO_2$  از ۹۳/۷ تا ۹۹/۵ درصد متغیر است. بیشتر نمونه‌ها بین ۹۸/۱۶ تا ۹۹/۵ درصد اکسید سیلیسیم دارند و بالاترین مقادیر در نمونه‌هایی در شمال، جنوب شرقی و غرب محدوده دیده می‌شود. کمترین مقادیر در شمال شرقی منطقه مشاهده می‌گردد (شکل ۶).





شکل ۵. A: کوارتز مونوکریستالین، پلی کریستالین و خرده سنگ چرت گرد شده (نمونه S-12)، B: کوارتز پلی کریستالین و کوارتز دگرگونی کشیده شده (نمونه S-30)، C: کوارتز مونوکریستالین، پلی کریستالین و دگرگونی کشیده شده همراه با قطعه مسکویت (نمونه S-2)، D: کوارتز پلی کریستالین و خرده سنگ دگرگونی مسکویت شیست (نمونه S-29)، E: قطعه میکروکلین (نمونه S-1)، F: قطعات هورنبلند بین کوارتزهای مونوکریستالین (نمونه S-13). (Qm = کوارتز مونوکریستالین، Qp = کوارتز پلی کریستالین، Ms = مسکویت، Mc = میکروکلین، Hbl = هورنبلند)

**Fig. 5.** A: Monocrystalline and polycrystalline quartz and rounded chert fragment (sample S-12), B: polycrystalline and metamorphic quartz (sample S-30), C: monocrystalline, polycrystalline, and metamorphic quartz associated with muscovite (sample S-2), D: polycrystalline quartz and muscovite schist fragment (sample S-29), E: microcline (sample S-1), F: hornblende within monocrystalline quartz (sample S-13). (Qm = monocrystalline quartz, Qp = polycrystalline quartz, Ms = muscovite, Mc = microcline, Hbl = hornblende)

بالاترین مقادیر در شمال شرقی و جنوب منطقه و تقریباً منطبق بر نمونه‌های با کمترین اکسید سیلیسیم و بیشترین اکسید آهن مشاهده می‌گردد (شکل ۸).  
اکسید کلسیم: مقدار CaO از صفر تا ۰/۶ درصد متغیر است.  
غالب نمونه‌ها کمتر از ۰/۲ درصد اکسید کلسیم دارند. فقط در ۷ نمونه مقدار این اکسید به بیش از ۰/۵ درصد افزایش یافته است (شکل ۹).

اکسید آهن: مقدار TFeO از ۰/۰۴ تا ۲/۷۲ درصد متغیر است.  
بیشتر نمونه‌ها بین ۰/۰۴ تا ۰/۴۲۵ درصد اکسید آهن دارند و کمترین مقادیر در نمونه‌هایی در جنوب، جنوب غربی و شمال محدوده دیده می‌شود. بالاترین مقادیر در شمال شرقی منطقه و منطبق بر نمونه‌های با کمترین اکسید سیلیسیم مشاهده می‌گردد (شکل ۷).

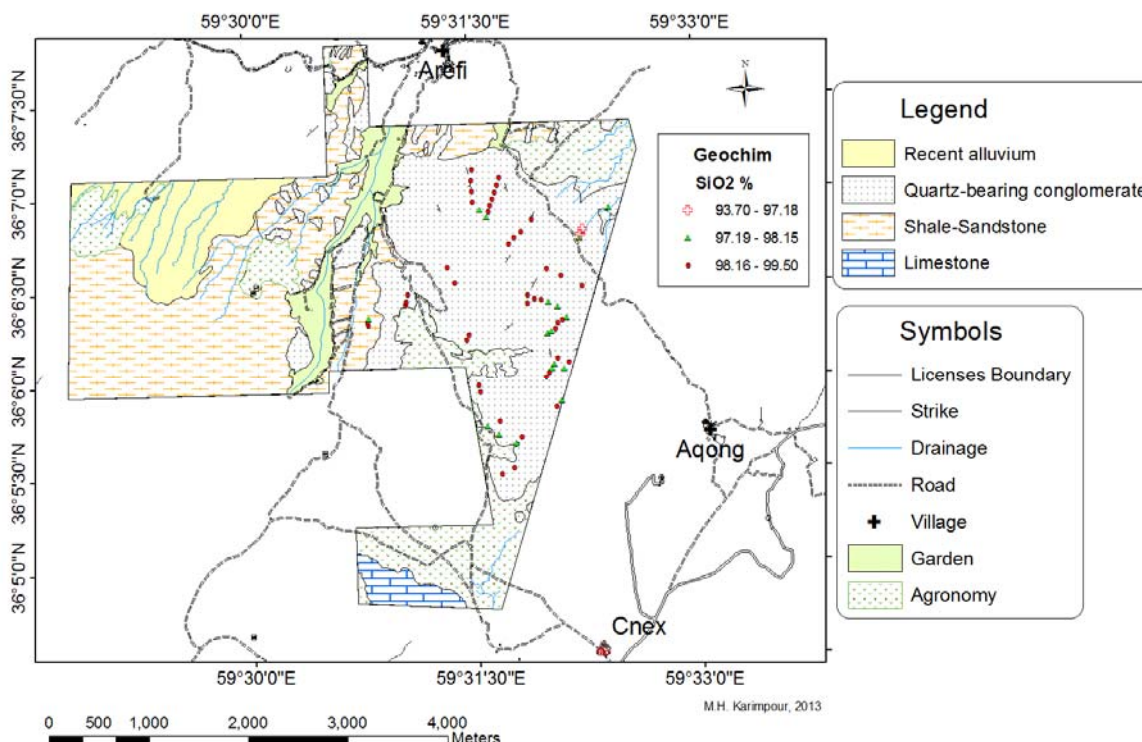
اکسید تیتان: مقدار  $TiO_2$  از ۰/۰۲ تا ۰/۱۶ درصد متغیر است.  
بیشتر نمونه‌ها بین ۰/۰۲ تا ۰/۱۶ درصد اکسید تیتان دارند.

مونوکریستالین - پلی کریستالین و نیز یک نمونه کوارتز دگرگونی کشیده شده انجام شد که خلاصه نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. مطالعات پتروگرافی سیالات درگیر در کوارتزهای مونوکریستالین و پلی کریستالین نشان داد که عمده سیالات درگیر از نوع ثانویه و بسیار ریز (کمتر از ۴ میکرون) هستند و به ندرت سیال درگیر اولیه در آنها یافت می‌شود. سیالات درگیر اولیه عمدتاً بزرگتر و به صورت مجزا بودند. براساس تقسیم‌بندیهای متداول (Roedder, 1984; Sheppherd et al., 1985)، سیالات درگیر ثانویه همگی از نوع دوفازی غنی از مایع (LV) بوده و به دلیل ریز بودن امکان دامسجی آنها وجود نداشت. سیالات درگیر اولیه نیز عمدتاً بی‌شکل تا بیضوی بوده و اندازه آنها از ۸ میکرون تجاوز نمی‌کرد؛ به طوری که بخش زیادی از آنها در حد ۴ یا ۵ میکرون بودند. نوع آنها سه فازی و شامل بلور نمک طعام (LVS) است.

در مرحله دوم به منظور بررسی عمقی کنگلومرا، تعداد ۱۰ چاله اکتشافی به عمق ۱۵ متر حفاری شد و هر ۵ متر حفاری (پودری) یک نمونه برداشت شده و به روش XRF برای اکسیدهای مذکور تجزیه شد. دامنه تغییرات میزان  $\text{SiO}_2$  در مقابل  $\text{TiO}_2$  و  $\text{TFeO}$  برای اعماق صفر تا ۵ متری، ۱۰ تا ۱۰ متری و ۱۰ تا ۱۵ متری در نمودارهای A-۱۰ تا F-۱۰ نمایش داده شده‌اند. میزان  $\text{SiO}_2$  در اعماق مختلف عمدتاً در محدوده ۹۸ تا ۹۹ درصد است. میزان  $\text{TFeO}$  کمتر از ۰/۲ درصد و میزان  $\text{TiO}_2$  بین ۰/۰۸ تا ۰/۰۲ درصد متغیر است (شکل A-۱۰ تا F-۱۰). در مجموع هیچ‌گونه تغییر مهمی بین نمونه‌های برداشت شده از ترانشه‌ها و نمونه‌های عمقی حاصل از حفاری به لحاظ عیار سیلیس، اکسید آهن و اکسید تیتانیم مشاهده نمی‌شود.

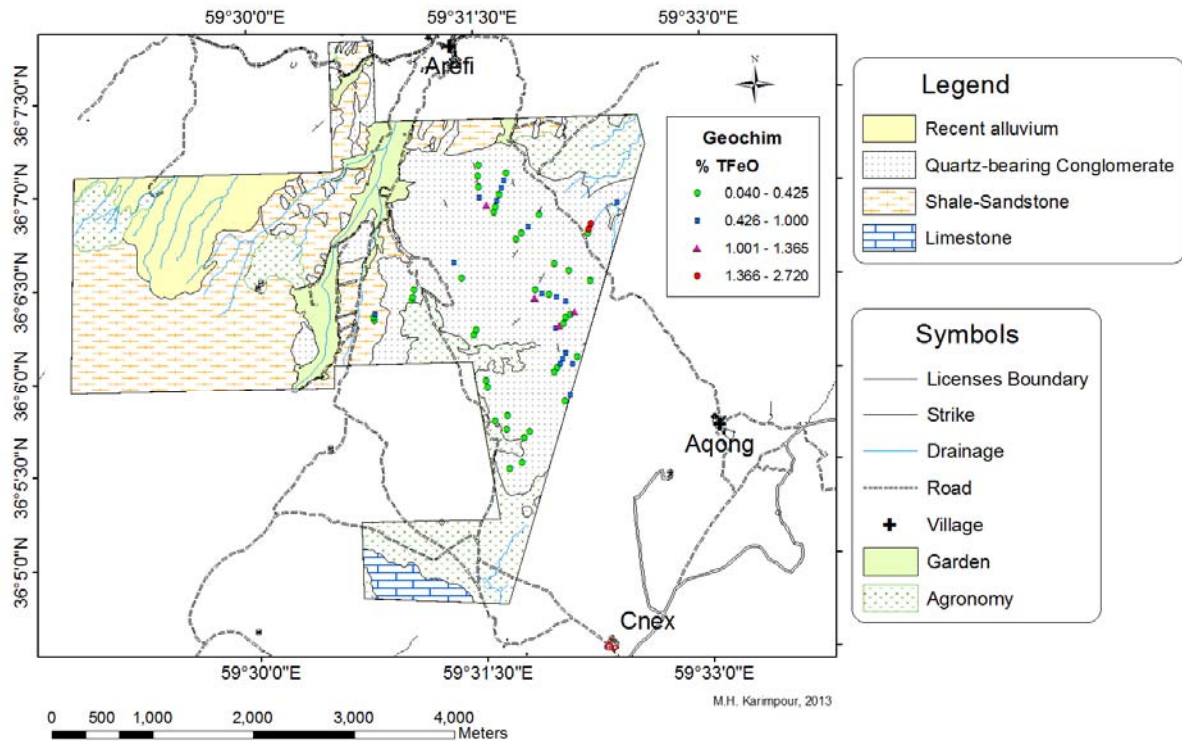
#### مطالعه سیال درگیر

به منظور تعیین منشأ کوارتزهای موجود در کنگلومرای عارفی، مطالعات سیالات درگیر بر روی ۴ نمونه از کوارتزهای



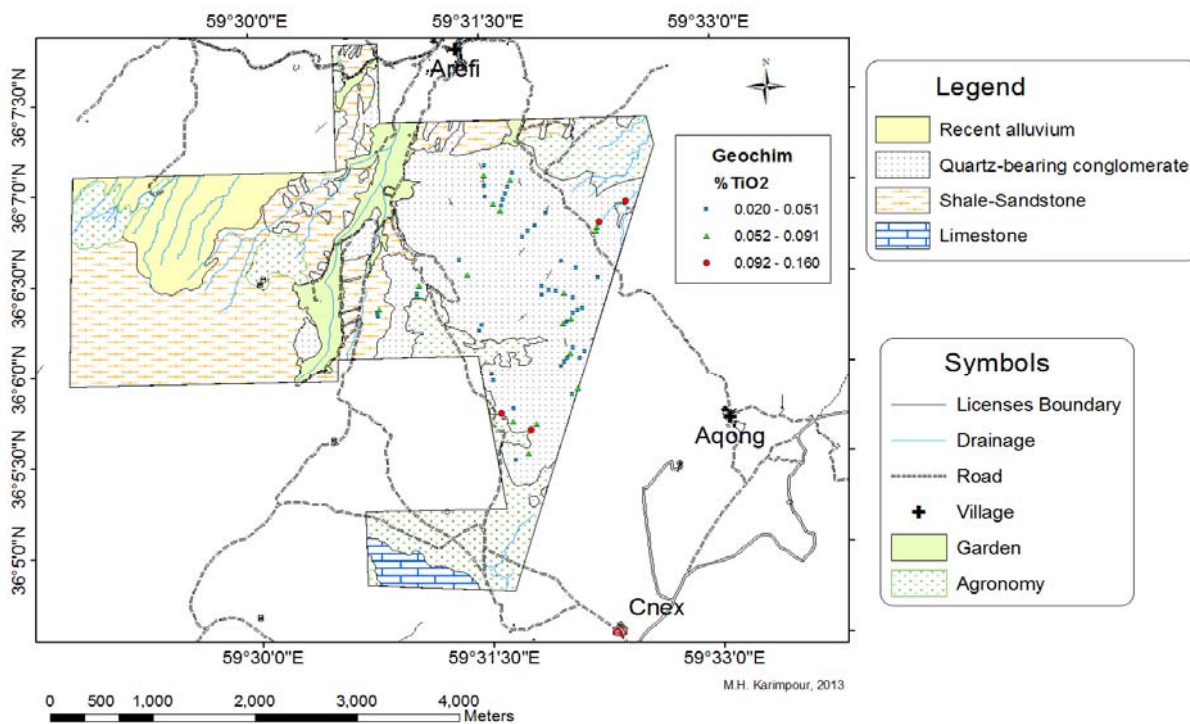
شکل ۶. مقدار  $\text{SiO}_2$  بر روی نقشه زمین‌شناسی محدوده عارفی

Fig. 6. Content of  $\text{SiO}_2$  overlain on geologic map of the Arefi area



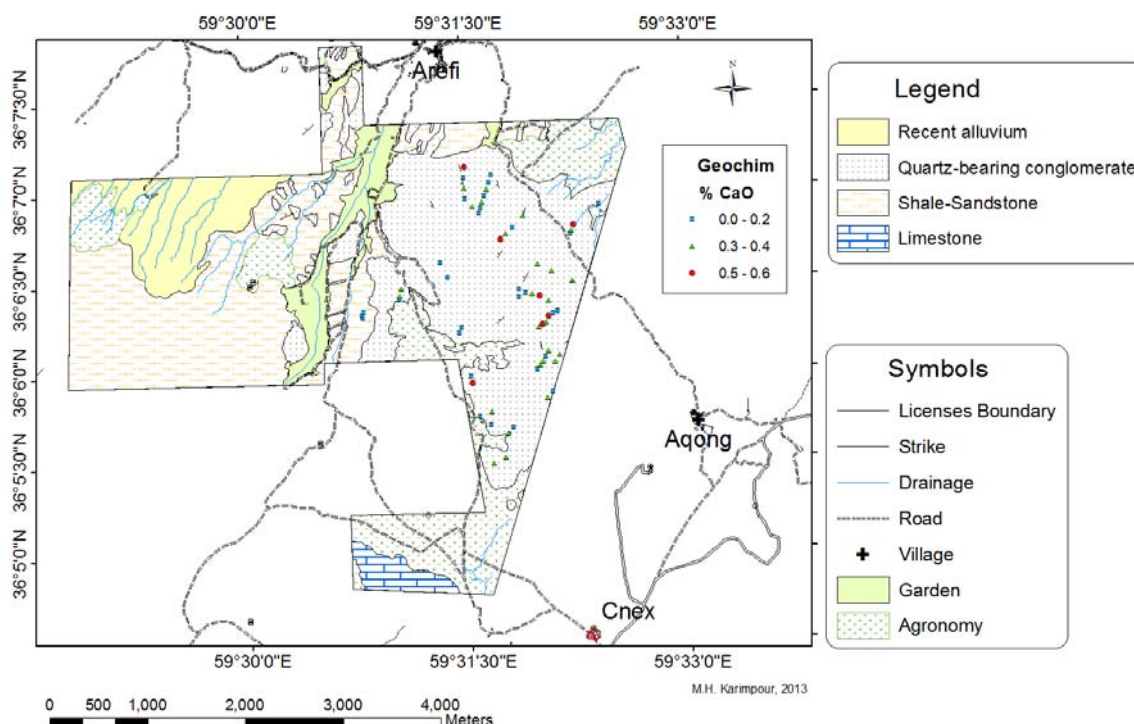
شکل ۷. مقدار TFeO بر روی نقشه زمین‌شناسی محدوده عارفی

Fig. 7. Content of TFeO overlain on geologic map of the Arefi area



شکل ۸. مقدار TiO<sub>2</sub> بر روی نقشه زمین‌شناسی محدوده عارفی

Fig. 8. Content of TiO<sub>2</sub> overlain on geologic map of the Arefi area



شکل ۹. مقدار CaO بر روی نقشه زمین‌شناسی محدوده عارفی

Fig. 9. Content of CaO overlain on geologic map of the Arefi area

جدول ۱. اطلاعات ریزدماسنجی سیالات درگیر اولیه در پیل‌های کوارتز کنگلومرای عارفی. (Qm = کوارتز مونوکریستالین، Qp = کوارتز پلی‌کریستالین، LVS = سیال سه‌فازی محتوی نمک، LV = سیال دوفازی غنی از مایع)

Table 1. Microthermometric data of primary fluid inclusions in the Arefi conglomerate quartz pebbles (Qm = Monocrystalline quartz, Qp = Polycrystalline quartz, LVS = Three-phase fluid including halite, LV = Two-phase liquid-rich)

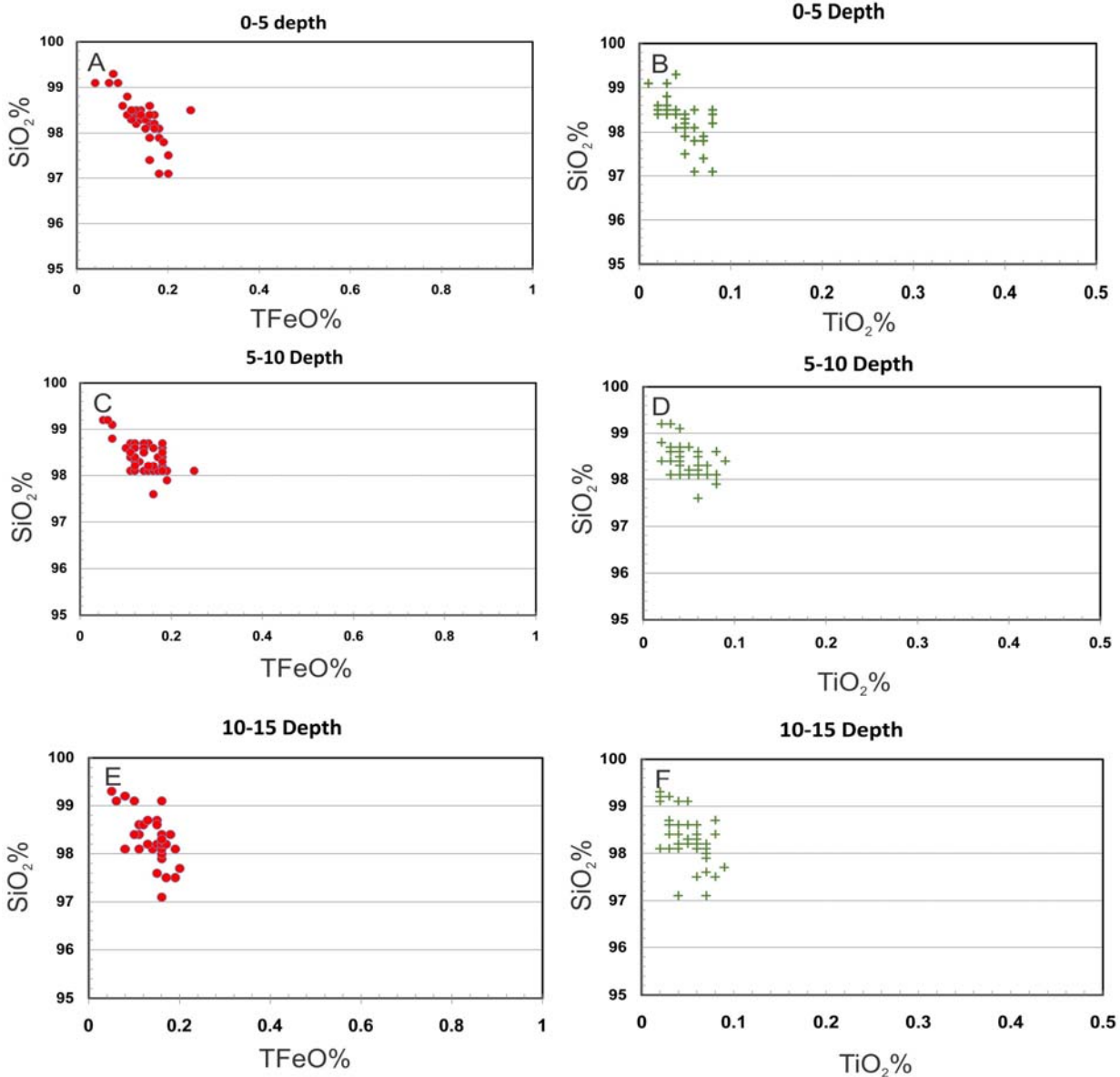
Sample No.	Quartz type	Fluid inclusion type	Number	Size (µm)	T <sub>h</sub> (L-V) (°C)	T <sub>m</sub> (NaCl) (°C)	Salinity (wt. % equiv.)	Density (gr/cm <sup>3</sup> )
S3	Qm, Qp	LVS	6	4 to 7	562->600	425-542	49.6-65.3	1-1.2
A17	Qm	LVS	5	4 to 6	484->600	469-586	55.5-71.8	1.1-1.3
S13	Qm, Qp	LVS	7	4 to 8	493->600	446-588	52.5-72.1	1.1-1.2
S17	Qm	LVS	5	4 to 6	514-589	462-554	54.5-67	1-1.2
	Metamorphic	LV	7	4 to 6	287-365	-	-	-

در طی عمل گرمایش در سیالات درگیر اولیه در کوارتزهای مونوکریستالین و پلی‌کریستالین ابتدا فاز نمک طعام ذوب شده و سپس فاز حباب از بین رفت، به طوری که همگی آنها با از بین رفتن فاز بخار همگن شدند. دمای همگن شدن (T<sub>h</sub>) سیالات درگیر اولیه نوع LVS بین ۴۸۴ تا بیش از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین دمای ۵۵۹ درجه سانتی‌گراد است (جدول ۱ و شکل A-۱۱). همچنین دمای ذوب شدن بلور

اندازه‌گیریهای دماسنجی و تعیین شوری بر روی این سیالات درگیر صورت گرفت (جدول ۱). در نمونه کوارتز دگرگونی کشیده شده نیز عمده سیالات درگیر ثانویه و از نوع LV بودند و به‌ندرت سیال درگیر اولیه با ابعاد ۴ تا ۶ میکرون یافت شد که آنها نیز دوفازی غنی از مایع بودند (جدول ۱). به‌علت ریز بودن سیالات در این نمونه فقط مطالعات دماسنجی انجام شد و شوریها اندازه‌گیری نشد.

مقدار  $T_m$  اندازه‌گیری شده، مقدار شوری بین ۴۹/۶ تا ۷۲/۱ درصد NaCl با میانگین ۶۱/۲ درصد متغیر است (جدول ۱ و شکل ۱۱-C).

نمک طعام ( $T_m$ ) بین ۴۲۵ تا ۵۸۸ درجه سانتی‌گراد با میانگین دمای ۵۱۱ درجه سانتی‌گراد است (جدول ۱ و شکل ۱۱-B). براساس سیستم  $H_2O-NaCl$  (Steele-MacInnis et al., 2012; Lecumberri-Sunchez et al., 2012) و



شکل ۱۰. A: تغییرات  $SiO_2$  به  $TFeO$  از عمق صفر تا ۵ متری چاله‌های اکتشافی، B: تغییرات  $SiO_2$  به  $TiO_2$  از عمق صفر تا ۵ متری چاله‌های اکتشافی، C: تغییرات  $SiO_2$  به  $TFeO$  از عمق ۵ تا ۱۰ متری چاله‌های اکتشافی، D: تغییرات  $SiO_2$  به  $TiO_2$  از عمق ۵ تا ۱۰ متری چاله‌های اکتشافی، E: تغییرات  $SiO_2$  به  $TFeO$  از عمق ۱۰ تا ۱۵ متری چاله‌های اکتشافی، F: تغییرات  $SiO_2$  به  $TiO_2$  از عمق ۱۰ تا ۱۵ متری چاله‌های اکتشافی

**Fig. 10.** A:  $SiO_2$  vs.  $TFeO$  from 0 to 5m of exploration hole, B:  $SiO_2$  vs.  $TiO_2$  from 0 to 5m of exploration hole, C:  $SiO_2$  vs.  $TFeO$  from 5 to 10m of exploration hole, D:  $SiO_2$  vs.  $TiO_2$  from 5 to 10m of exploration hole, E:  $SiO_2$  vs.  $TFeO$  from 10 to 15m of exploration hole, F:  $SiO_2$  vs.  $TiO_2$  from 10 to 15m of exploration hole

متوسط TFeO، به مقدار ۰/۱۲ کاهش یافت. همچنین میانگین عیار متوسط TFeO در نمونه درشت‌دانه، در کل نمونه و در بازه ابعادی ۰/۱۶ تا ۱ میلی‌متر و در بازه ابعادی ۰/۱۶ تا ۱ میلی‌متر به ترتیب، ۰/۴۰، ۰/۳۳ و ۰/۲۸ به‌دست آمد. با حذف ابعاد کمتر از ۱ میلی‌متر میانگین عیار متوسط TFeO، به مقدار ۰/۰۷ کاهش یافت. مرحله آسیا کنی سیلیس به دلایل زیر انجام شده است:

- ۱- در صورت امکان آزاد کردن ذرات آهن‌دار
- ۲- دانه‌بندی محصول مورد نظر در ابعاد مطلوب
- ۳- بهینه‌سازی زمان خردایش و محاسبه بار در گردش آزمایش آسیاکنی به همراه آنالیز سرنندی در زمانهای مختلف. پس از آن آزمایش کلاسیفایر هوایی انجام شد که نتایجی برای حذف آهن در نمونه‌ها نداشت. پس از آن جهت کاهش مقدار آهن محتوی نمونه اولیه سیلیس، آزمایش مغناطیسی خشک با شدت میدان بالا (۱۴۰۰۰ گوس) انجام گرفت. در بهترین شرایط عیار TFeO به ۰/۰۳ درصد و TiO<sub>2</sub> به ۰/۰۲ درصد رسید که می‌تواند برای صنایع شیشه کاربرد داشته باشد و در صورت استفاده از روش فرآوری تر قطعاً کیفیت خروجی سیلیس فرآوری شده بالاتر خواهد بود.

#### نتیجه‌گیری

کنگومرای کوارتزار عارفی با وجود بیش از ۹۷ درصد کوارتز در قالب قطعات و سیمان و مقدار اکسید آهن پایین و نیز نزدیکی به شهر مشهد، یکی از منابع غنی از سیلیس و حایز اهمیت برای صنایع مختلف محسوب می‌شود.

ارتفاعات بینالود نواری چین‌خورده و گسلیده از نوع نازک پوسته‌ای است که به‌دنبال تصادم میان قطعات لیتوسفری ایران و توران و از بین رفتن اقیانوس پالئوتتیس در تریاس پسین در حاشیه شمال شرقی ایران تشکیل شده است. به دنبال این تصادم، توده‌های نفوذی با ترکیب اسیدی- حدواسط از نوع سری ایلمنیت (احیایی) در نتیجه ذوب‌بخشی پوسته قاره‌ای تشکیل شدند. براساس مطالعات سن‌سنجی به‌روش U-Pb بر روی کانی زیرکن (Karimpour et al., 2009; Karimpour et al., 2010; Karimpour et al., 2011) توده گرانودیوریتی کوهسنگی در ۲۱۷ میلیون سال پیش، توده دیوریتی دهنو در ۲۱۵ میلیون سال پیش، لوکوگرانیت‌های خواجه مراد در ۲۰۵ میلیون سال پیش و

این سیالات درگیر بسیار چگال بوده و چگالی آنها نیز بین ۱ تا ۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد (جدول ۱). حداقل دمای تشکیل و شوری بسیار بالای سیالات درگیر در کوارتزهای مونوکریستالین و پلی‌کریستالین نشان‌دهنده ماهیت ماگمایی این کوارتزهاست و ارتباط آنها با توده‌های آذرین را تأیید می‌کند (شکل ۱۲).

همچنین دامنه دمای همگن شدن در سیالات درگیر دوفازی نمونه کوارتز دگرگونی کشیده شده بین ۲۸۷ تا ۳۶۵ درجه سانتی‌گراد با میانگین دمای ۳۱۸ درجه سانتی‌گراد است (جدول ۱ و شکل ۱۱-D). با توجه به این‌که بلور نمک طعام در آنها دیده نشده است، مقدار شوری نیز کمتر از ۲۴ درصد وزنی می‌باشد، اما شوری دقیق سیالات به‌دلیل ریز بودن اندازه‌گیری نشد. دمای همگن شدن این سیالات نسبتاً متوسط بوده و ماهیتی شبیه به آبهای دگرگونی (۱۷۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) (Kesler, 2005) را نشان می‌دهد. اما آبهای دگرگونی شوری کمتر از ۱۰ درصد دارند (Kesler, 2005) که تأیید این موضوع در نمونه مورد مطالعه نیاز به تعیین دقیق میزان شوری دارد (شکل ۱۲).

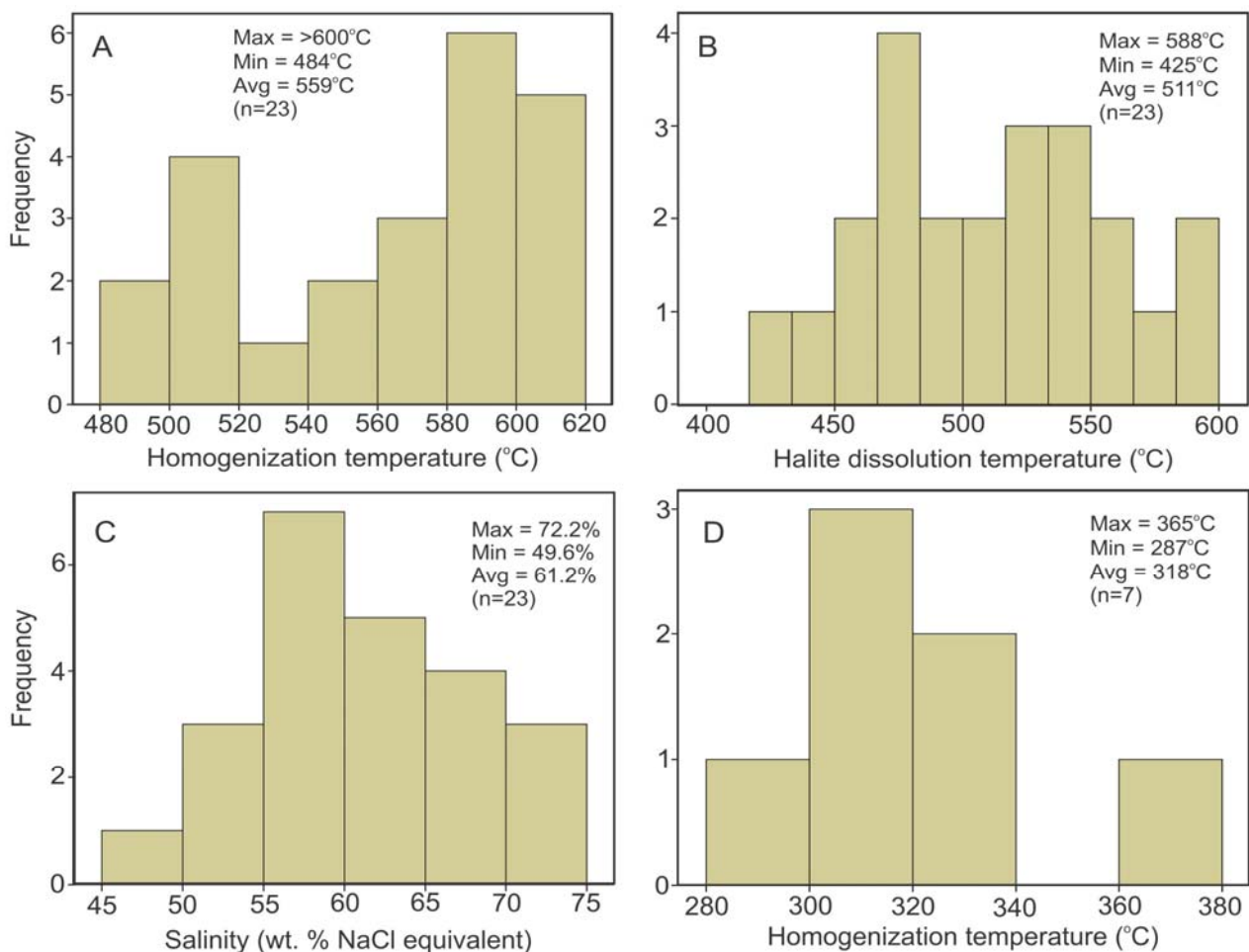
#### فرآوری سیلیس عارفی

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، یک عامل اصلی و مهم در کاربرد سیلیس، مقدار SiO<sub>2</sub> است و مهمترین اکسیدهای مزاحم، TFeO، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و TiO<sub>2</sub> هستند. نمونه‌های سیلیس عارفی دارای مقدار SiO<sub>2</sub> عمدتاً بیش از ۹۸ درصد، مقدار TFeO کمتر از ۰/۴۲ درصد و TiO<sub>2</sub> کمتر از ۰/۱۶ درصد است که به لحاظ کارایی بسیار مطلوب به‌نظر می‌رسد. اما به‌منظور کاهش بیشتر مقدار TFeO و TiO<sub>2</sub> نمونه‌ها، تعدادی نمونه مورد آزمایشهای فرآوری قرار گرفت. مطالعات فرآوری شامل خردایش، آسیاکنی، دانه‌بندی، کلاسیفایر هوایی و جدایش مغناطیسی بوده است. در مرحله خردایش، نمونه طی سه مرحله سنگ‌شکنی (فکی بزرگ، فکی کوچک و مخروطی) به فراکسیون ابعادی کوچکتر از ۲ میلی‌متر رسانده شد. محصول سنگ‌شکنی جهت جدایش فراکسیون‌های ابعادی درشت‌دانه و ریزدانه مورد آنالیز سرنندی قرار گرفت. میانگین عیار متوسط TFeO در نمونه ریز دانه، در کل نمونه و در بازه ابعادی ۰/۱۶ تا ۱ میلی‌متر به ترتیب، ۰/۵۱ و ۰/۳۹ به‌دست آمد. با حذف ابعاد کمتر از ۱۰۶ میکرون، میانگین عیار

موزوگرانیت‌های سنگ‌بست در ۲۲۵ میلیون سال پیش یعنی اواخر تریاس تشکیل شده‌اند. همچنین دو مرحله دگرگونی ناحیه‌ای در منطقه اتفاق افتاده است که اولی مربوط به کوه‌زایی هرسینین در اواخر پالئوزوئیک و دومی مربوط به کوه‌زایی سیمیرین در اوایل ژوراسیک است ( Karimpour et al., 2009).

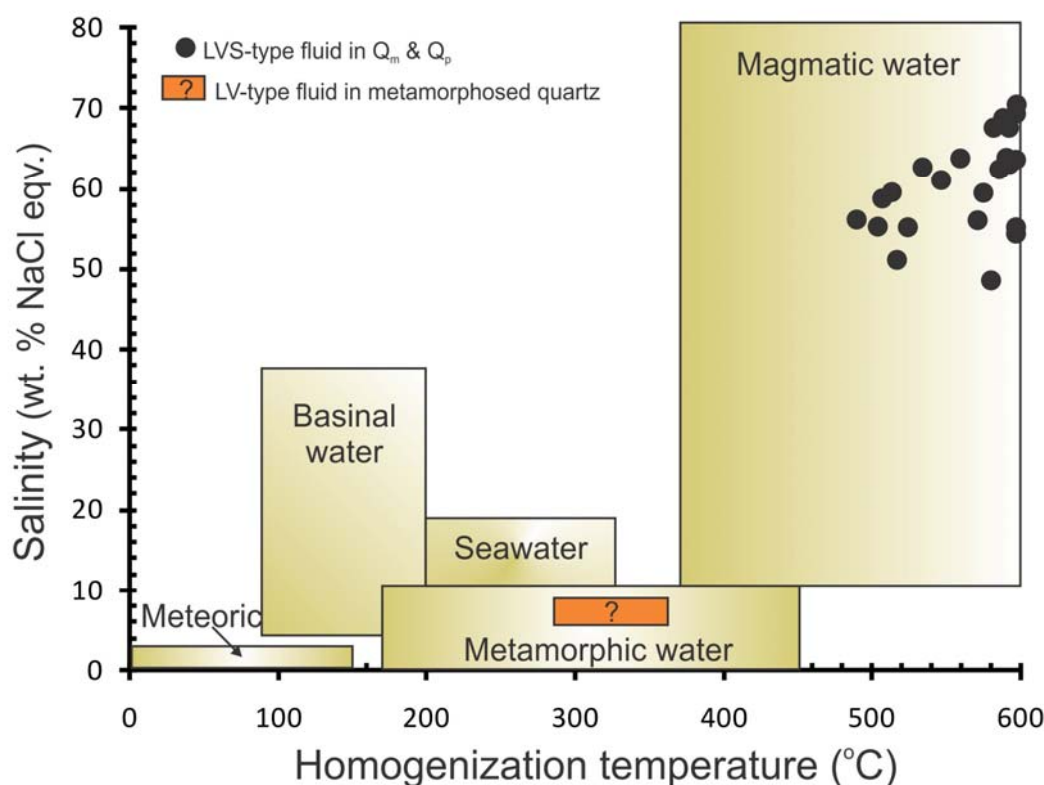
سن تقریبی کنگلومرای عارفی ژوراسیک میانی تعیین شده است و این رسوبات پس از وقوع دگرگونی‌های ناحیه‌ای و نفوذ توده‌های احیایی تشکیل شده‌اند. از سوی دیگر ( Lammerer

در تکمیل وقایع تکتونیکی بینالود، به یک چین‌خوردگی و تراستی شدن شدید ارتفاعات بینالود در فاصله زمانی بین ژوراسیک تحتانی و فوقانی اشاره کرده‌اند. رحیمی (Rahimi, 1992)، سه نسل گسل‌های راندگی را در ارتفاعات بینالود معرفی کرد که نسل اول با حرکات سیمیرین و آلپ پیشین همراه بوده و باعث تشکیل رسوبات آواری در تریاس فوقانی، ژوراسیک تحتانی، ژوراسیک میانی و قاعده کرتاسه شده است.



شکل ۱۱. A: هیستوگرام دمای همگن شدن سیالات درگیر سه فازی LVS در کوارتزهای مونوکریستالین و پلی‌کریستالین، B: هیستوگرام دمای ذوب بلور نمک طعام سیالات درگیر سه فازی LVS در کوارتزهای مونوکریستالین و پلی‌کریستالین، C: هیستوگرام مقدار شوری سیالات درگیر سه فازی LVS در کوارتزهای مونوکریستالین و پلی‌کریستالین، D: هیستوگرام دمای همگن شدن سیالات درگیر دو فازی LV در کوارتز دگرگونی

**Fig. 11.** A: Homogenization temperature histogram of three-phase fluid inclusions (LVS) in monocrystalline and polycrystalline quartz, B: halite dissolution temperature histogram of three-phase fluid inclusions (LVS) in monocrystalline and polycrystalline quartz, C: Salinity histogram of three-phase fluid inclusions (LVS) in monocrystalline and polycrystalline quartz, D: homogenization temperature histogram of two-phase fluid inclusions (LV) in metamorphic quartz



شکل ۱۲. نمودار شوری در مقابل دمای همگن شدن سیالات درگیر با محدوده آبهای مختلف از (Kesler, 2005). سیالات نوع سه فازی در کوارتز مونو کریستالین و پلی کریستالین در محدوده آبهای ماگمایی و سیالات نوع دو فازی کوارتزهای دگرگونی احتمالاً در محدوده آبهای دگرگونی قرار می‌گیرند (Qm = کوارتز مونو کریستالین، Qp = کوارتز پلی کریستالین)

**Fig. 12.** Homogenization temperature vs. salinity diagram for fluid inclusions with fields for various fluid types after Kesler (2005). Three-phase fluid inclusions in mono- and polycrystalline quartz plot in magmatic water field and two-phase types in metamorphic quartz probability plot in metamorphic water field (Qm = monocrystalline quartz, Qp = polycrystalline quartz)

گرانیته‌ی - پگماتیته‌ی (تریاس فوقانی) محدوده‌ی خواجه مراد و رگه‌های کوارتز تشکیل شده در زمان دگرگونی ناحیه‌ای، است. مطالعات سیالات درگیر در کوارتزها نیز این مسأله را تأیید می‌کند؛ به طوری که کوارتزهای مونو کریستالین و پلی کریستالین که بخش اعظم کنگلومرا را تشکیل می‌دهند، از سیالی با دما و شوری بسیار بالا (میانگین دمای ۵۵۹ درجه سانتی‌گراد و شوری ۶۱ درصد) تشکیل شده‌اند که ماهیت ماگمایی دارد. کوارتزهای دگرگونی نیز سیالات درگیری دارند که میانگین دمای تشکیل آنها ۳۱۸ درجه سانتی‌گراد با شوری کمتر از ۲۴ درصد است و نشان‌دهنده احتمالاً ماهیت آبهای دگرگونی است.

بر اساس مقدار  $\text{SiO}_2$ ، سیلیس را می‌توان به سه نوع درجه یک (بیش از ۹۶ درصد  $\text{SiO}_2$ )، درجه دو (بین ۸۵ تا ۹۶ درصد

زمانی که یک حوضه اقیانوسی بسته می‌شود؛ به علت برخورد دو صفحه قاره‌ای و افزایش ضخامت لیتوسفر یک کمربند کوهزایی تشکیل می‌گردد که باعث دگرشکلی یا دگرگونی در قسمت‌های زیرین پوسته و گسل خوردگی در ترازهای بالای کمربند کوهزایی می‌شود. در مجاورت این کمربند کوهزایی در حاشیه پوسته قاره‌ای یک حوضه فورلند تشکیل می‌گردد (Miall, 1981). نظیر این رویداد در شمال شرق ایران رخ داده است. فعالیت گسل‌های راندگی جدید، بالا آمدگی و فرسایش سنگ‌های قدیمی را به همراه داشته و مقادیر فراوانی از رسوبات آواری را به حوضه فورلند مجاور این کمربند کوهزایی حمل و باعث تشکیل طبقات کنگلومرای عارفی شده است (Hashemi, 2004). لذا مهمترین منشأ کوارتزهای موجود در کنگلومرا، رگه‌های کوارتز در بخش فوقانی توده‌های



۰/۰۲ درصد نیز کاهش یافته است. لذا ذخیره سیلیس عارفی از نوع درجه یک محسوب شده و برای صنایع شیشه‌سازی و ظروف شیشه‌ای مرغوب پیشنهاد می‌شود.

#### قدردانی

اعتبار پژوهشی این پروژه از محل پژوهش در دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۲۹۰۵۷/۲ مورخ ۱۳۹۲/۱۰/۳ تأمین شده است. نویسندگان از شرکت مهندسی دانش فراوران برای انجام آزمایشهای فرآوری سپاس‌گزاری می‌کنند.

(SiO<sub>2</sub>) و درجه سه (بین ۷۰ تا ۸۵ درصد SiO<sub>2</sub>) تقسیم کرد. سیلیس درجه یک عمدتاً در صنایع شیشه‌سازی، لعاب، صنایع شیمیایی، فروسیلیس، پشم شیشه، سیلیکات سدیم، فروکروم و ماسه تست سیمان؛ سیلیس درجه دو در صنایع ریخته‌گری، ماسه سندبلاست، فیلتراسیون و دیرگذاها؛ و سیلیس درجه سه در صنایع آجر ماسه آهکی و آجر سبک، کارخانجات تولید سیمان و بتن سبک کاربرد دارد. برپایه مطالعات ژئوشیمیایی سطحی و عمقی، نمونه‌های سیلیس عارفی دارای مقدار SiO<sub>2</sub> عمدتاً بیش از ۹۸ درصد، مقدار TFeO کمتر از ۰/۴۲ درصد و TiO<sub>2</sub> کمتر از ۰/۱۶ درصد هستند که با انجام آزمایشهای مغناطیسی خشک مقدار TFeO به ۰/۰۳ درصد و TiO<sub>2</sub> به

#### References

- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin, 103(8): 983-992.
- Blair, T.C. and Macpherson, J.G., 1999. Grain size and textural classification of coarse sedimentary particles. Journal of Sedimentary Research, 69(1): 6-19.
- Folk, R L., 1980. Petrology of sedimentary rocks. Hemphill publishing, Austin, Texas, 182 pp.
- Hasemi, S.F., 2004. Petrology and depositional environment of Jurassic conglomerate in south of Mashhad. Unpublished M.Sc. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 200 pp. (in Persian)
- Karimpour, M.H., Farmer, G.L. and Stern, C.R., 2009. Geochronology, radiogenic isotope geochemistry, and petrogenesis of Sangbast Paleo-Tethys monzogranite, Mashhad, Iran. Iranian Crystallography and Mineralogy of Iran, 17(4): 706-719. (in Persian)
- Karimpour, M.H., Farmer, G.L. and Stern, C.R., 2011. Rb-Sr and Sm-Nd Isotopic Compositions, U-Pb Age and Petrogenesis of Khajeh Mourad Paleo-Tethys Leucogranite, Mashhad, Iran. Scientific Quarterly Journal Geosciences, 20(80): 171-182. (in Persian)
- Karimpour, M.H., Stern, C.R. and Farmer L., 2010. Zircon U-Pb geochronology, Sr-Nd isotope analyses, and petrogenetic study of the Dehnow diorite and Kuhsangi granodiorite (Paleo-Tethys), NE Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 37(4): 384-393.
- Kesler, E.S., 2005. Fluids in Planetary Systems: ore-Forming Fluids. Elements, 1(1): 13-18.
- Khatonie Molayossefi, M., 2000. The study of stratigraphy and plants fossils of Shemshak formation in Shandiz area. Unpublished M.Sc. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 222 pp. (in Persian)
- Lammerer, B., Lamgheinrich, G. and Danai, M.M., 1983. The tectonic evolution of the Binalood mountains (NE Iran). In Geodynamic project (geotraverse) in Iran, Geological Survey of Iran, Report 51, pp. 91-102.
- Lecumberri-Sanchez, P., Steel-MacInnis, M. and Bodnar, R.J., 2012. A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance. Geochim Cosmochim Acta, 92: 14-22.
- Miall, A.D., 1981. Alluvial sedimentary basins: tectonic setting and basin architecture. In: A.D. Miall (Editor), Sedimentation and tectonics in alluvial basins. Geological Association of Canada, Special paper 23, pp. 1-33.
- Miall, A.D., 1996. The Geology of fluvial deposits. Sedimentary facies. Basin Analysis and Petroleum Geology, Springer-Verlag, New York, 582 pp.
- Miall, A.D., 2000. Principle of sedimentary basin analysis. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 668 pp.
- Moussavi Harami, S.R., 1995. Sedimentology. Press Astan Quds Razavi, Mashhad, 479 pp. (in Persian)
- Pettijohn, F.J., 1975. Sedimentary rocks. 3<sup>rd</sup> edition, Harper and Row, New York, 628 pp.
- Rahimi, B., 1992. Structural analysis of Binalood mountains in east and northeast of Neyshabour (Droud map). Unpublished M.Sc. thesis,

- Kharazmi University of Tehran, Tehran, Iran, 179 pp. (In Persian)
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy* 12, 644 pp.
- Sahabi, F., 1996. *Sedimentary petrology*. Tehran University Press, Tehran, 266 pp. (in Persian)
- Sheppherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Blackie and Son, Virginia, 239 pp.
- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P. and Bodnar, R.J., 2012. HOKIEFLINCS-H2O-NACL: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H<sub>2</sub>O–NaCl. *Computers Geosciences*, 49: 334–337.
- Taheri, J. and Ghasemi, F., 2001. Geologic map of Mashhad, scale 1:100,000. Geological Society of Iran, Tehran.
- Tucker, M.E., 2001. *Sedimentary petrology*. 3<sup>rd</sup> edition, Blackwells, Oxford, 260 pp.



## Mineralogy, geochemistry, genesis, and industrial application of silica in Arefi area, south of Mashhad

Mohammad Hassan Karimpour<sup>1\*</sup>, Azadeh Malekzadeh Shafaroudi<sup>1</sup> and Saeid Saadat<sup>2</sup>

1) Research Center for Ore Deposits of Eastern Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2) Department of Geology, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

Submitted: Apr. 21, 2014

Accepted: Sep. 23, 2014

**Keywords:** Silica-rich conglomerate, mineralogy, geochemistry, source of quartz, industrial applications, Arefi area.

### Introduction

Arefi quartz-bearing conglomerate (Middle Jurassic) is situated within Binalud structural zone. The unit is trending NW-SE located 25 km south of Mashhad. More than 97% of the pebbles are quartz as mono-crystalline, poly-crystalline, and minor fragments of chert, quartzite, and mica schist. Less than 3% of the remaining minerals are feldspar, mica, chlorite, hornblende, tourmaline, zircon, sphene, and opaque minerals. The cement is mainly silica. Hashemi (Hashemi, 2004) suggested this unit is orthoquartzitic polymictic conglomerate.

In this study, we carried out detailed mineralogical studies, geochemical analyses for SiO<sub>2</sub> and troublesome elements, determination of quartz pebbles source using geological observations and fluid inclusion microthermometry, and industrial application studies with new insight for porcelain and ceramic factories as the nearest silica-rich reserve to Mashhad.

### Material and methods

1. Preparing geologic map in 1:10000 scale in the Arefi area.
2. Petrographic study of 65 samples from the quartz-bearing conglomerate unit.
3. Major elements such as SiO<sub>2</sub>, TFeO, TiO<sub>2</sub>, and CaO were analyzed at the Maghsoud Porcelain Factories Group, using a Philips PW1480 X-ray spectrometer.
4. Ore dressing analyses in Danesh Faravaran Engineering Company.
5. Fluid-inclusion studies in 4 samples doubly-polished wafers of quartz crystals were studied using standard techniques (Roedder, 1984) and Linkam THM 600 heating-freezing stage (from –

190 to 600°C) mounted on a Olympus TH4–200 microscope stage at Ferdowsi University of Mashhad, Iran. Salinities and density of fluid inclusions were calculated using the Microsoft Excel spreadsheet HOKIEFLINCS-H<sub>2</sub>O-NACL (Steele-MacInnis et al., 2012; Lecumberri-Sanchez et al., 2012)

### Results and Discussion

Fluid Inclusion studies of both mono- and poly-crystalline quartz revealed that the inclusions consist of three phases (LVS) with NaCl crystals. Homogenization temperature is between 484 and more than 600°C with average 559°C and the salinity is between 49.6 and 72.1 wt% NaCl with average 61.2 wt% NaCl. These data indicate a magmatic origin according to Kesler (Kesler, 2005) diagram. Homogenization temperature of two phases (LV) inclusions in the metamorphosed quartz is between 287 and 365°C with average 318°C. The main source of quartz pebbles is quartz veins formed within the top of pegmatite-granite (upper Triassic) of Khajeh-Morad area and quartz veins formed due to regional metamorphism.

Based on chemical analysis of 93 samples which were taken from the surface (channel method) and power drilling, the SiO<sub>2</sub> content is more than 98%, TFeO is less than 0.42% and TiO<sub>2</sub> is less than 0.16%. The proved ore reserve is more than 50 million tonnes. Using dry magnetic method, the TFeO became less than 0.03% and TiO<sub>2</sub> less than 0.02%. Arefi silica deposit is a first-class reserve and can be used in different types of ceramic.

### Acknowledgments

The Research Foundation of Ferdowsi University of Mashhad, Iran, supported this study (Project

\*Corresponding author's email: karimpur@um.ac.ir

No. 29057.2). We also thank Danesh Faravaran Engineering Company for the ore dressing analyses.

### Reference

- Hasemi, S.F., 2004. Petrology and depositional environment of Jurassic conglomerate in south of Mashhad. Unpublished M.Sc. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 200 pp. (in Persian)
- Kesler, E.S., 2005. Fluids in Planetary Systems: ore-Forming Fluids. *Elements*, 1(1): 13–18.
- Lecumberri-Sanchez, P., Steele-MacInnis, M. and Bodnar, R.J., 2012. A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance. *Geochim Cosmochim Acta*, 92: 14-22.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy* 12, 644 pp.
- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P. and Bodnar, R.J., 2012. HOKIEFLINCS-H<sub>2</sub>O-NACL: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H<sub>2</sub>O–NaCl. *Computers Geosciences*, 49: 334–337.