



## ویژگی‌های کانی‌شناسی، ژئوشیمی، گوه‌شناسی و علل تنوع رنگ در آگات‌های میانه، شمال غرب ایران

بهزاد حاج علیلو<sup>۱\*</sup>، بهرام وثوق<sup>۱</sup>، محسن مؤذن<sup>۲</sup>

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور مرکز تبریز

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

(دریافت مقاله: ۸۹/۱/۲۹، نسخه نهایی: ۸۹/۸/۲)

**چکیده:** کانی‌سازی آگات در منطقه‌ی میانه، درون واحدهای آتشفشانی اسیدی ائوسن به شکل پرکننده حفره‌ها رخ داده است. این سنگ‌های آتشفشانی دارای ماهیت پتاسیک تا شوشونیتی بوده و به کمان‌های آتشفشانی و قوس‌های پس از برخورد وابسته‌اند. سنگ‌های درونگیر آگات‌ها بیشتر از ایگنیمبریت و ریولیت تشکیل شده‌اند. رنگ‌های آبی، قرمز، نارنجی، خاکستری، سبز و سیاه، ساختارهای ستاره‌ای، گل‌کمی، شعاعی، حلقوی و بافت‌های نواری و رشته‌ای در آگات‌ها دیده می‌شوند. مهم‌ترین عامل مؤثر در ایجاد رنگ آبی، مس و در ایجاد رنگ‌های سیاه، قرمز و دودی آهن و منگنز اند. نمونه‌ها صیقل خوری و شفافیت خوبی دارند. سختی آن‌ها ۶٫۷ تا ۷، با چگالی در حدود ۲٫۶۴، فاقد خاصیت چندرنگی و فلئوئورسانسی‌اند. از نظر ژئوشیمیایی، آلومینیم و مواد فرار کاهش محسوسی نسبت به افزایش سیلیس نشان می‌دهند. همچنین رفتار عناصر نادر خاکی نشانگر سرشت مشابه ماگمایی برای آگات‌ها است. آزمایش‌های متعدد نشان داد که بهترین دما برای رنگ‌آمیزی مصنوعی آگات‌های قرمز و نارنجی  $500^{\circ}\text{C}$  و آگات‌های آبی روشن و تیره  $550^{\circ}\text{C}$  است.

**واژه‌های کلیدی:** آگات؛ رنگ‌آمیزی؛ ژئوشیمی؛ ساخت و بافت؛ عناصر نادر خاکی؛ گوه‌ر؛ میانه؛ آتشفشانی اسیدی.

### مقدمه

متعددی در این زمینه بوده‌اند [۲]. فراوانی معادن سنگ‌های ارزشمند و کم ارزش مثل فیروزه و آگات باعث رونق این تجارت در گذشته بوده است، در حالی که امروزه فقط در مناطق محدودی مثل مشهد این صنعت به فعالیت خود ادامه می‌دهد [۳]. علیرغم فراوانی کانی‌های کم ارزشتر در کشور، متأسفانه کارهای پژوهشی صورت گرفته در این زمینه بسیار محدود بوده و تعداد مقالات چاپ شده در نشریات معتبر در این مورد انگشت شمارند. در این پژوهش سعی شده است تا ویژگی‌های کانی‌شناسی، ژئوشیمیایی و اهمیت گوه‌شناسی آگات‌های

اهمیت و نقش کانی‌ها و سنگ‌های ارزشمند و کم ارزش در زندگی انسان‌ها بر کسی پوشیده نیست. استفاده‌های زینتی، دارویی و صنعتی، از موارد استفاده اینگونه کانی‌ها و سنگ‌ها به شمار می‌روند. تجارت سنگ‌ها و کانی‌های ارزشمند و کم ارزش پس از تجارت اسلحه و مواد مخدر، پرسودترین تجارت دنیا محسوب می‌شود [۱]. شواهد تاریخی نشانگر منزلت گوه‌شناسی نزد ایرانیان بوده و دانشمندانی مثل ابوریحان بیرونی، ابوعلی سینا و خواجه نصیرالدین طوسی دارای تألیفات

\* نویسنده مسئول، تلفن - نمابر: ۵۴۳۲۹۲۶ (۰۴۱۱)، پست الکترونیکی: [hajalilou@pnu.ac.ir](mailto:hajalilou@pnu.ac.ir)

منطقه‌ی میانه مورد بحث قرار گیرد. این مقاله اولین مقاله‌ی است که در این زمینه نوشته می‌شود.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش بیش از ۴۰ نمونه از انواع آگات‌های منطقه‌ی میانه نمونه‌برداری شدند. ۳۵ مقطع نازک از آگات‌ها تهیه و مورد بررسی قرار گرفتند. برای بررسی ویژگی‌های گوهرشناسی، نمونه‌ها به صورت گرد، محذب، تخت، زاویه‌دار و زینتی توسط گوهرتراشان شهرستان‌های مشهد، تبریز و میانه تراش داده شدند. بیش از ۳۰ نمونه از انواع آگات‌های میانه برای این کار انتخاب شدند. برای بررسی و تحلیل عوامل رنگ‌زا تعداد ۸ نمونه نیز به روش XRF با دستگاه Philips مدل PW1480 در شرکت کانساران بینالود مورد بررسی قرار گرفتند. حد تشخیص این دستگاه برای عناصر رنگ‌دار مثل مس، کرم، تیتان، منگنز و کبالت تقریباً ۱ ppm بوده است. به منظور شناخت تأثیر گرمادهی روی رنگ آگات‌ها، روش‌های مختلفی در فشار یک اتمسفر به کار گرفته شد، و طی ۷ مرحله، نمونه‌ها در دماهای ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفتند و تغییرات رنگ در آن‌ها ثبت شدند. برای این منظور، از کوره‌ی آزمایشگاهی با امکان ثبت دقیق دما استفاده شد [۴].

#### زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی

گستره‌ی آذربایجان در رده‌بندی ساختاری-رسوبی ایران در زون البرز-آذربایجان قرار می‌گیرد [۵]. این منطقه از سرزمین ایران، حوادث زیادی را پشت سر گذاشته است که آثار آن از پرکامبرین (زمین‌های دگرگونی میانه) تا امروز (ولکانیسم فعالیت‌های آتشفشانی سبلان و سهند) قابل مشاهده‌اند. با توجه به نقشه‌ی زمین‌شناسی آذربایجان (شکل ۱) بخش بزرگ آن به وسیله‌ی رسوب‌های ترشیری، سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی پوشیده شده است [۶].

شهرستان میانه به‌عنوان گستره‌ی مورد بررسی، یکی از مناطق امیدبخش برای پی‌جویی کانی‌های کم ارزش از جمله آگات به شمار می‌رود [۴]. سنگ‌های آتشفشانی ائوسن پسین و الیگوسن، دارای گسترش وسیعی در منطقه‌ی میانه هستند. این سنگ‌ها اغلب دارای ترکیب ریولیت، ایگنیمبریت، ریوداسیت و تراکیت هستند. نتایج تجزیه‌های شیمیایی بیانگر ماهیت آهکی-قلیایی پتاسیک تا شوشونیتی آن‌هاست و ارتباط آن‌ها را با رژیم کمان‌های آتشفشانی پس از برخورد نشان می‌دهد [۷]. در ائوسن زیرین و میانی نیز، منطقه‌ی میانه شاهد فعالیت‌های آتشفشانی گسترده بوده است که اغلب به صورت

تناوب جریان‌های گدازه‌ای آندزیتی، بازالتی و تراکی آندزیتی با لایه‌های متناوب لیتیک توف، توف ماسه‌ای، توف برشی و توف شیشه‌ای است. گذر فعالیت‌های آتشفشانی ائوسن زیرین و میانی به الیگوسن به صورت تظاهر سنگ‌های ایگنیمبریتی، ریولیتی، تراکیتی و توف برشی است که روی مجموعه ائوسن قرار گرفته و در برخی مناطق دارای کانی‌سازی آگات است [۷].

#### شرایط و چگونگی تشکیل آگات

نام آگات از رودخانه‌ی آچات در جزیره سیسیل ایتالیا گرفته شده است [۸]. آگات به خانواده‌ی کوارتزهای رشته‌ای و گروه کلسدونی وابسته است. آگات معمولاً از نوارهای پی‌درپی کلسدونی و کوارتز تشکیل می‌شود که به سبب وجود اکسیدهای فلزی، به رنگ‌های متفاوت ظاهر می‌شود و با عنوان Leisegang شناخته می‌شوند [۹]. ترکیب شیمیایی آگات به صورت اکسید سیلیسیم ( $\text{SiO}_2$ ) است. برای تشکیل کانی‌های گروه کلسدونی از جمله آگات، وجود محلول‌های غنی از سیلیس ضروری است. برای تشکیل این گونه محلول‌ها دو نظریه وجود دارد [۱۰]:

الف) این محلول‌ها در اثر تبلور فازهای سیلیکاتی فقیر از سیلیس (کانی‌های مافیک) در ماگمای در حال سرد شدن و انباشت سیلیس در فازهای نهایی تبلور به وجود می‌آیند.

ب) محلول‌های غنی از سیلیس در اثر انحلال و شستشوی سیلیس از متن سنگ‌های قبلی حاصل می‌شود.

تشکیل کلسدونی از محلول‌های غنی از سیلیس بستگی به عواملی چون کاهش دما و فشار، تغییرات Eh و pH دارد. سیلیس کلونیدی به وسیله‌ی محلول‌ها حمل و به صورت ژل ته‌نشین می‌شود. در جریان ته‌نشینی که به کندی صورت می‌گیرد، با تغییر شرایط محیطی، تغییر رنگ در مواد نهشته شده و حالت نواری در کوارتز نهان بلورین به وجود می‌آید [۱۰]. بخش بزرگ کلسدونی تشکیل شده در طبیعت خاستگاه آذرین (نظریه اول) دارند. فازهای باقیمانده ناشی از تبلور سنگ‌های اسیدی که اشیاع از سیلیس شده‌اند، ضمن حمله به سنگ‌ها، شکاف‌ها و حفره‌های موجود در آن‌ها را اشغال کرده و با کاهش دما به صورت کوارتز رشته‌ای (کلسدونی) در درون آن‌ها سرد شده و در نتیجه آگات تشکیل می‌شود.

#### ویژگی‌های زمین‌شناسی و گوهرشناسی آگات‌های میانه

علیرغم اینکه شرایط تشکیل فاز کلسدونی و از جمله آگات یکسان است، ولی تغییر شرایط محلی و موضعی باعث ایجاد تنوع از نظر رنگ، ساخت، بافت و ویژگی‌های متفاوت

۳) روستای وهیل در ۳۵ کیلومتری شمال‌شرقی میانه قرار دارد. این محل در منتهی‌الیه جنوب غربی ورقه ی ۱:۱۰۰۰۰۰ کوثر واقع شده است. سنگ‌های آگات‌دار این منطقه بیشتر تراکیت و تراکی‌آندزیت با سن الیگوسن هستند که روی توفهای خاکستری و سبز ائوسن قرار گرفته‌اند. گسترش ریولیت و ایگنیمبریت در این منطقه بسیار کم است.

۴) منطقه‌ی داش‌قلعه‌سی در ۳۸ کیلومتری شرق میانه، (بخش شمال‌غربی ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین) قرار دارد. سنگ‌های آگات‌دار این منطقه شامل تراکیت و تراکی‌آندزیت است که بدلیل دگرسانی به شدت متلاشی شده و نمونه‌های آگات در سطح خاک‌های منطقه رها شده‌اند. این سنگ‌ها روی واحدهای توفی ائوسن قرار گرفته‌اند.

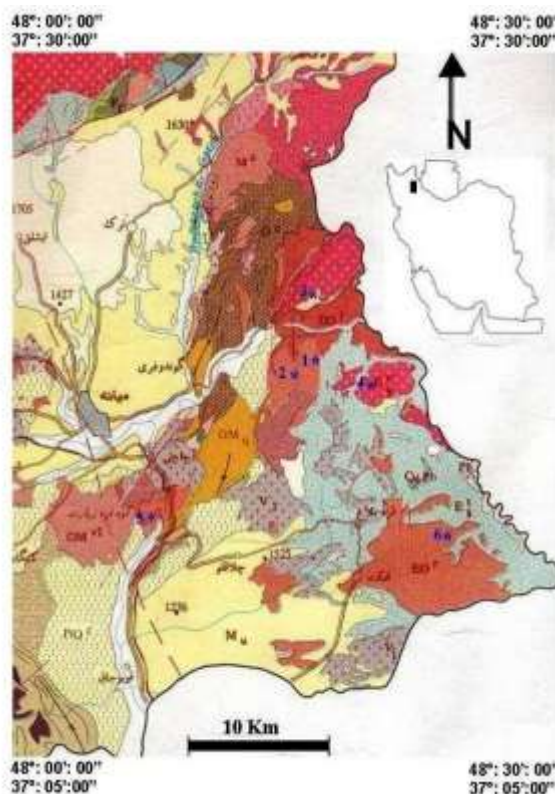
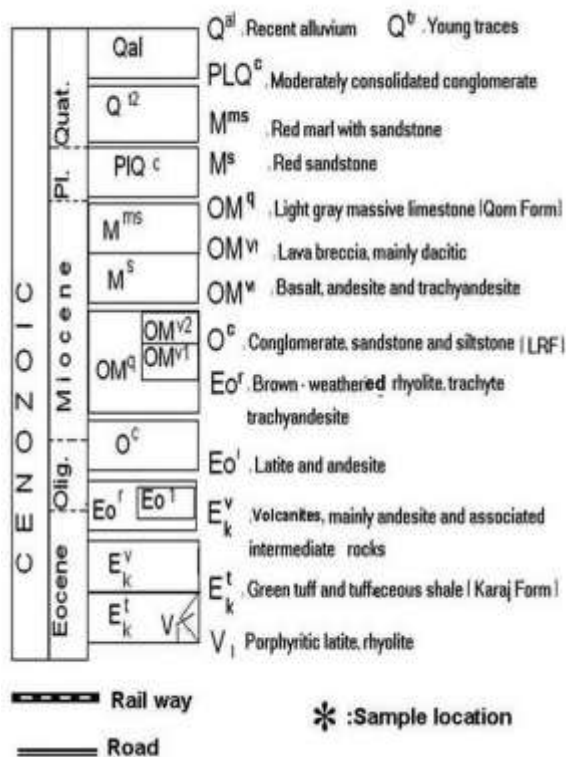
۵) منطقه قیز قلعه‌سی که در ۲۰ کیلومتری جنوب‌شرق شهرستان میانه، در بخش جنوبی قافلان‌کوه، و در کنار جاده ی میانه-تهران قرار دارد. این منطقه در ورقه ی ۱:۱۰۰۰۰۰ واقع شده است. در این منطقه شاهد گسترش بسیار زیاد سنگ‌های ریولیتی و ایگنیمبریتی الیگوسن با ساخت جریان‌ی هستیم (شکل ۲ الف)، که روی توفهای ائوسن و در زیر مارن-های گچ‌دار میوسن قرار گرفته‌اند.

گوهرشناسی در آگات‌ها می‌شود. در زیر به مهم‌ترین ویژگی‌های زمین‌شناسی و گوهرشناسی آگات‌های میانه اشاره می‌شود.

تقریباً تمام رخنمون‌های آگات در منطقه‌ی میانه در نواحی شمال‌شرقی، شرق و جنوب‌شرقی این شهرستان و بیشتر در بخش‌های مرکزی و بخش کاغذکنان قرار دارند [۱۱]. در ۶ نقطه از شهرستان میانه شاهد گسترش گسترده ای از سنگ‌های آگات‌دار هستیم (شکل ۱)، که عبارتند از [۴]:

۱) روستای ماوی که در ۲۴ کیلومتری شمال شرق آق‌کند (مرکز بخش کاغذکنان) و در منتهی‌الیه شمال‌غربی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین قرار دارد. سنگ‌های آگات‌دار در این منطقه به صورت گدازه‌های ریولیتی، ریوداسیتی و ایگنیمبریتی با سن الیگوسن اند که روی ویتریک توف‌ها و لیتیک توف‌های ائوسن قرار گرفته‌اند.

۲) روستای زرنجین که در ۵ کیلومتری غرب روستای ماوی، ۳۰ کیلومتری شرق میانه و در منتهی‌الیه شمال‌شرقی ورقه ی ۱:۱۰۰۰۰۰ میانه قرار دارد. در این منطقه شاهد گسترش سنگ‌های ایگنیمبریتی و ریولیتی الیگوسن هستیم که روی توفهای سبز و لیتیک توف‌های ائوسن قرار داشته و دارای آگات فراوانند.



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی و پراکندگی مناطق آگات‌دار میانه (با مقیاس تقریبی ۱:۵۰۰۰۰۰) (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی آذربایجان [۶]).



شکل ۲ (الف) ساخت جریان‌ی در ایگنیمبریت‌های منطقه‌ی قیزقلعه‌سی. (ب) ساخت جریان‌ی در ایگنیمبریت‌های منطقه‌ی ولستان.

۶) روستای ولستان که در ۱۸ کیلومتری شمال‌شرقی آق‌کند (مرکز بخش کاغذکنان) و تقریباً در بخش میانی ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین واقع شده است. گسترش سنگ‌های ریولیتی و ایگنیمبریتی آگات‌دار به سن الیگوسن با ساخت جریان‌ی در این منطقه زیاد است (شکل ۲ ب). این سنگ‌ها روی توف‌های سبز و خاکستری ائوسن قرار دارند [۱۲].

#### ساخت آگات‌های میانه

با توجه به چگونگی تشکیل آگات‌ها، شاهد رخداد ساختاری مختلف در آن‌ها هستیم که اغلب نتیجه‌ی ته‌نشینی تدریجی

محلول‌های اشباع از سیلیس در شکاف‌ها و حفره‌های سنگ-هاست [۱۳]. از ساخت‌های مهمی که در کالسدونی‌های منطقه‌ی میانه مشاهده می‌شود می‌توان به ساخت ستاره‌ای، بلوردانی، شعاعی، حلقوی و گل‌کلمی اشاره کرد (شکل ۳). در ساخت ستاره‌ای، دیواره‌ی حفره‌ها به وسیله کالسدونی و بخش-های درونی‌تر به وسیله کواتز درشت‌بلور [۱۳] پر شده است. به نظر می‌رسد علت ایجاد این ساخت وجود حفره‌های ستاره‌ای شکل در سنگ‌های درونگیر کالسدون‌ها باشد (شکل ۳-الف). در ساخت ژئودی بخش حاشیه‌ای حفره از کالسدونی، بخش‌های



شکل ۳ ساختار (الف) ستاره‌ای. (ب) بلوردانی. (پ) گل‌کلمی. (ت) شعاعی و حلقوی.

بافت نواری و رشته‌ای از دیگر بافتهای مشاهده شده در آگات‌های میانه است (شکل ۴ پ، ت). بافت رشته‌ای از انباشت رشته‌های بلورهای بسیار ریز کوارتز که به تدریج به کوارتزهای درشت بلور تبدیل می‌شوند و بافت نواری از سرد شدن سریع ژل‌های سیلیسی در دیواره‌ی حفره‌ها و سرد شدن آرام آنها در بخشهای داخلی‌تر حفره‌ها به وجود آمده‌اند [۴].

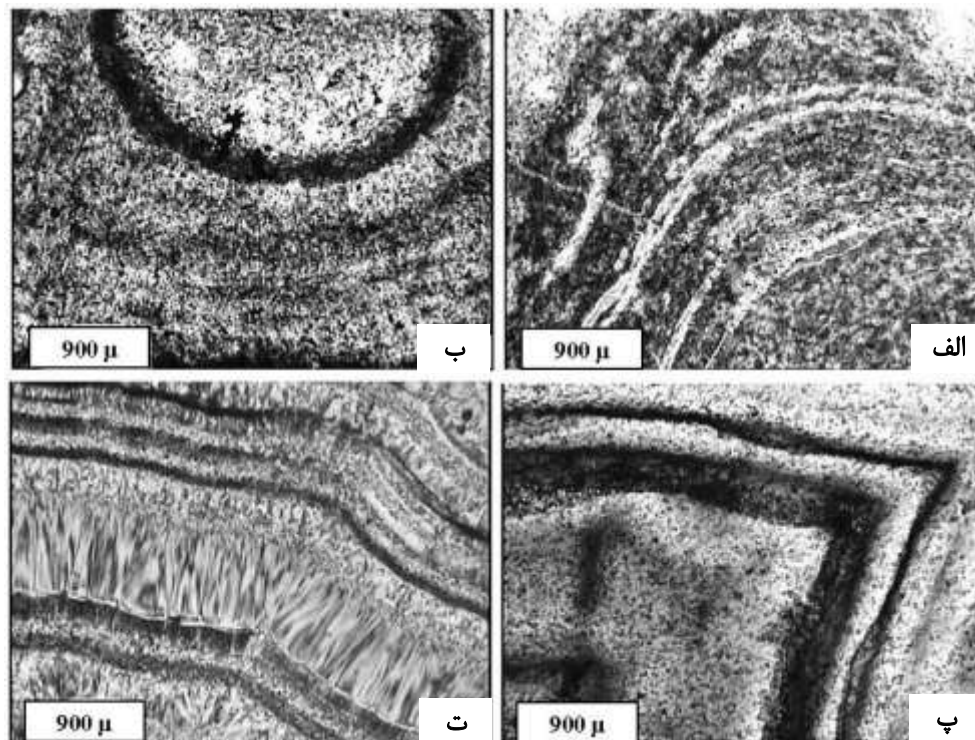
#### ویژگی‌های گوهرشناسی آگات‌های میانه

به منظور بررسی ویژگی‌های گوهرشناسی آگات‌های میانه اقدام به تراش مدور، زاویه‌دار و اندازه‌گیری برخی از ویژگی‌های گوهرشناسی مثل صیقل خوری، ضریب شکست، خاصیت فلورسانسی، گرانی ویژه، سختی، شفافیت، نوع شکستگی و رنگ سائیدگی آنها شد. از هر ۶ منطقه‌ی مورد بررسی، حداقل دو نمونه برای اندازه‌گیری پارامترهای یاد شده به آزمایشگاه گوهرشناسی ارسال شدند. در پاره‌ای از موارد ویژگی‌های اندازه‌گیری شده برای آگات‌های مناطق مختلف با هم تفاوت دارند ولی در بیشتر موارد شباهت زیادی در نمونه‌ها دیده شد [۱۳]. در جدول شماره ۱ ویژگی‌های گوهری آگات‌های میانه با همدیگر مقایسه شده‌اند.

میانی از کوارتز درشت بلور و بخش مرکزی از کلسیت خود شکل با رنگ عسلی پر شده است. این توالی در واقع به ترتیب نشانگر نهشت پی در پی فاز سیلیکاتی به صورت سریع (کالسدونی) و آرام (کوارتزهای درشت‌بلور) و فاز کربناتی (کلسیت) از محلول‌های گرمایی غنی از سیلیس است (شکل ۳ ب). ساخت گل‌کلمی (شکل ۳ پ) نیز از ساختارهایی است که به صورت محدود در پاره‌ای از مناطق مشاهده می‌شود [۴]. اغلب این ساختارها متأثر از شکل فضاهای خالی پر شده به وسیله‌ی محلول‌های غلیظ سیلیسی هستند. گاهی تشکیل کالسدونی به صورت حلقوی، شعاعی و یا ترکیبی از این دو است. بخش بیرونی این نوع کالسدونی از آگات نواری و بخش درونی آنها از کوارتزهای شفاف و درشت بلور تشکیل می‌شود. (شکل ۳ ت)

#### ویژگی‌های بافتی آگات‌های میانه

برای بررسی‌های بافتی روی آگات‌های منطقه‌ی میانه بیش از ۱۵ مقطع نازک تهیه کردیم. بافت جریان‌ی (شکل ۴ الف) و بافت اسفرولیتی (شکل ۴ ب) مهم‌ترین بافتهای مشاهده شده در سنگ‌های ایگنیمبریتی، ریولیتی و پیرومریتی آگات‌دار منطقه میانه است [۴].



شکل ۴ بافتهای میکروسکوپی در سنگ‌های ایگنیمبریتی و آگات‌های منطقه‌ی میانه: (الف) بافت جریان‌ی (ppl) (ب) بافت اسفرولیتی (ppl) (پ) بافت نواری (xpl) (ت) بافت رشته‌ای (xpl).

جدول ۱ ویژگی‌های گوه‌رشناختی آگات‌های میانه.

رنگ صائیدگی	رنگ	شکستگی	شفافیت	سختی	چگالی	فلوئورسانس	چند رنگی	ضریب شکست	تراکم	صیقل خوری	خصوصیت
											گوه‌ری
											نام منطقه
سفید	آبی	صدفی	خوب	۷	۲۶۶	-	-	۱,۵۵	خوب	عالی	ماوی
سفید	آبی کمرنگ	صدفی	متوسط	۶,۸	۲۶۳	-	-	۱,۵۴	متوسط	خوب	زرنجین
خاکستری کمرنگ	سیاه	صدفی	متوسط	۷	۲۶۵	-	-	۱,۵۵	خوب	خیلی خوب	وهیل
سفید	خاکستری	صدفی	واکسی	۷	۲۶۴	-	-	۱,۵۳	خوب	خوب	دانش قلعه‌سی
سفید	نارنجی کمرنگ	صدفی	واکسی	۶,۷	۲۶۶	-	-	۱,۵۵	خوب	خیلی خوب	قیز قلعه‌سی
سفید	نارنجی کمرنگ	صدفی	واکسی	۷	۲۶۵	-	-	۱,۵۴	خوب	خیلی خوب	ولستان

## ژئوشیمی

به طوریکه در آگات‌های به رنگ روشن، این اکسیدها در بیشترین مقدار و در آگات‌های تیره‌رنگ (آبی، قرمز، دودی و سیاه) در کمترین مقدار خود دیده شدند.

همزمان با افزایش درصد سیلیکا، آلومینیم کاهش پیدا می‌کند. همچنین اکسیدهای آهن، منگنز، منیزیم، تیتانیم، کلسیم و سدیم ارتباط مشخصی را نسبت به مقدار سیلیکا نشان نمی‌دهند. تغییرات فسفر متناوب بوده و حداکثر مقدار آن در ۹۸/۱٪ سیلیس است. مواد فرار (LOI) تغییرات معنی‌داری را نسبت به افزایش درصد سیلیکا از خود نشان می‌دهند. چنان‌که با افزایش درصد سیلیکا، میزان مواد فرار، کاهش می‌یابد.

## عناصر کمیاب

برای نشان دادن خاستگاه احتمالی شاره‌های سازنده آگات‌ها در منطقه‌ی میانه و تأثیر مقادیر مختلف عناصر فرعی و کمیاب در رنگ‌های ایجاد شده در این آگات‌ها، رفتار این عناصر در آگات‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، مقادیر عناصر فرعی و نادر خاکی نسبت به مقادیر کاندیریت به‌نجار شده‌اند [۱۰، ۱۴]. بر اساس شکل ۶، هرچند تمامی داده‌های وابسته به عناصر نادر خاکی برای آگات‌های بررسی شده در دست نیست، ولی با استفاده از داده‌های موجود (برای هشت عنصر نادر خاکی از LREEs تا MREEs) شاید بتوان در خصوص رفتار این عناصر در آگات‌های بررسی شده و تأثیر آن‌ها در رنگ آگات‌ها نتیجه گیری کرد.

برای بررسی ترکیب شیمیایی آگات‌های میانه و نیز شناخت تأثیر عناصر رنگزا (آهن، مس، منگنز، کروم، تیتانیم؛ نیکل و کبالت) در این آگات‌ها، هشت نمونه به آزمایشگاه XRF شرکت کانساران بینالود ارسال شدند. در نمونه‌های یاد شده ۱۰ اکسید اصلی، مقدار مواد فرار (L.O.I)، ۱۹ عنصر فرعی و ۸ عنصر کمیاب مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۲).

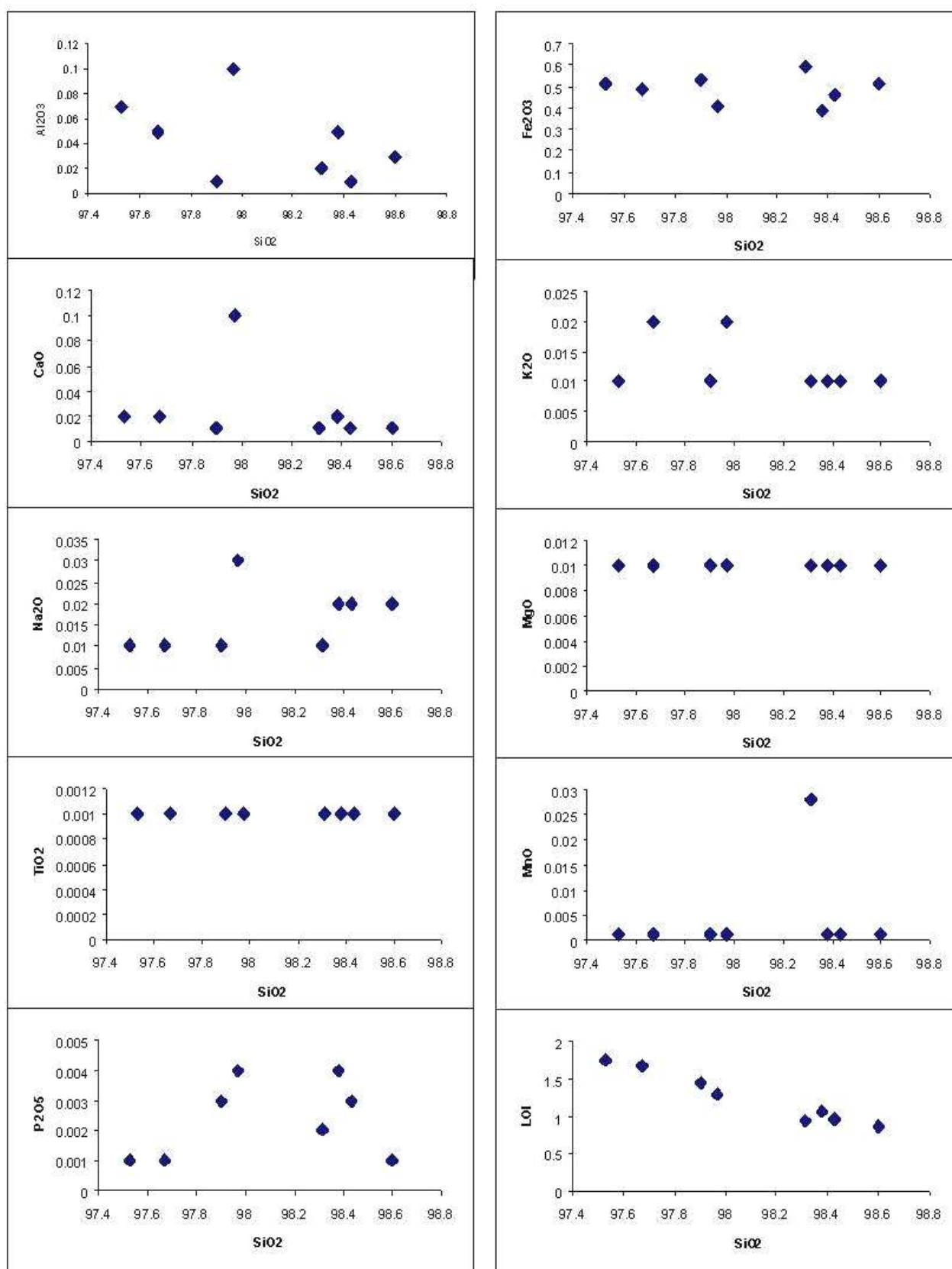
از ۸ نمونه‌ی ارسالی ۴ نمونه به آگات‌های آبی‌رنگ (نمونه‌های 32، 35a، 35b، 35c)، یک نمونه به رنگ سبز (نمونه‌ی 35d)، یک نمونه به دودی (نمونه‌ی 36a)، یک نمونه به قرمز (نمونه‌ی 36b) و یک نمونه به آگات سیاه‌رنگ (نمونه‌ی 40). وابسته بودند مقدار  $SiO_2$  کلیه‌ی نمونه‌ها بین ۹۷/۵ تا ۹۸/۵ درصد برآورد شدند.

به منظور بررسی رفتار ژئوشیمیایی اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و کمیاب در آگات‌های مناطق مختلف میانه و نیز شناخت ارتباط ژنتیکی بین این آگات‌ها، نمودارهای تغییرات اکسیدهای اصلی نسبت به سیلیکا و نمودارهای عنکبوتی ترسیم و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند.

## اکسیدهای اصلی

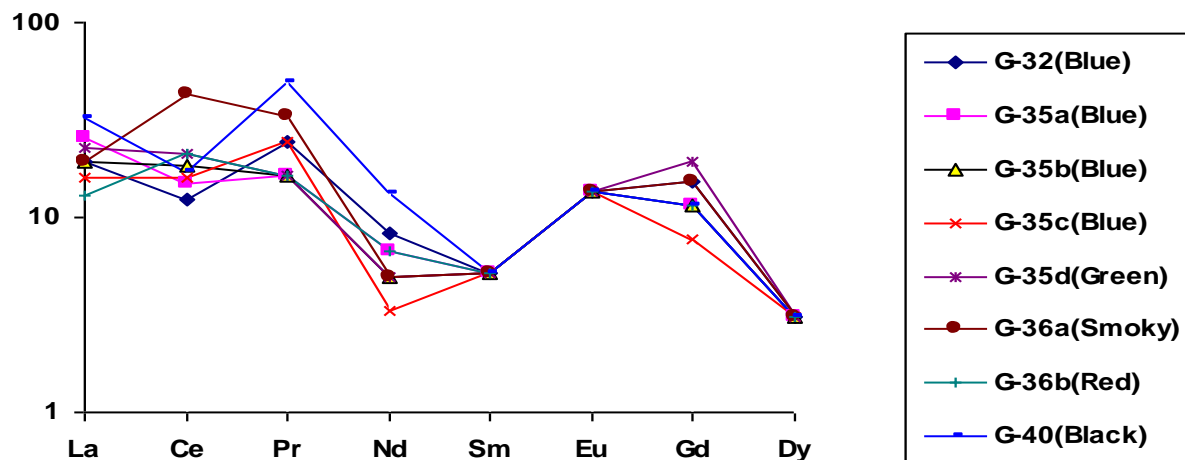
برای بررسی تغییرات اکسیدهای اصلی (جدول ۲) نسبت به سیلیکا از نمودارهای دو مؤلفه‌ای تغییرات سیلیکا نسبت به اکسیدها استفاده شد (شکل ۵). تغییرات مقدار اکسیدهای کلسیم، سدیم، پتاسیم و آلومینیوم دارای روند مشخصی است،





شکل ۵ تغییرات اکسیدهای اصلی نسبت به سیلیس در آگات‌های منطقه‌ی میانه.





شکل ۶ مقادیر بهنجار شده ترکیب شیمیایی آگات‌های میانه برحسب رنگ آن‌ها به کندیت [۱۴].

بی‌هنجاری مثبت Eu شاید بتواند توجیه‌گر تغییرات دمایی گسترده در ماگمای مولد گرماب تولید کننده آگات باشد. علاوه بر این غنی‌شدگی Eu نشانگر تشکیل شاره‌ی کانه زا (شاره‌های مولد آگات) به‌عنوان محصول نهایی یک ماگمای جدایشی یافته است. اگر شاره‌ی کانه‌زا محصول جدایشی یک ماگما باشد، از Eu غنی می‌شود [۱۷].

#### تنوع رنگ در آگات‌های میانه

آگات در بیش از ۳۰ رنگ مختلف در طبیعت دیده می‌شود. از عوامل اصلی تأثیرگذار در رنگ آگات‌ها می‌توان به ساختار میکروسکوپی آنها، وجود نفوذی‌های مایع، جامد گاز و به ویژه حضور عناصر فلزی رنگ‌زا مثل آهن، کروم، مس، تیتانیوم، منگنز، کبالت و نیکل اشاره کرد [۸].

آگات‌های میانه نیز در مناطق مختلف به رنگ‌های متفاوتی دیده می‌شوند [۱۸] که از آن جمله می‌توان به رنگ‌های آبی روشن، آبی نفتی، سیاه، قرمز، قهوه‌ای، خاکستری، سبز و نارنجی اشاره کرد.

#### عوامل مؤثر در رنگ آگات‌های میانه

مقدار متوسط اکسید آهن در نمونه‌های آبی رنگ ۰/۴۴ درصد، در آگات‌های با رنگ سبز، قرمز و دودی ۰/۵ درصد و در آگات‌های سیاه ۰/۵۹ درصد است که نشانگر تأثیر مهم آهن در رنگ آگات‌هاست. مقدار منگنز در آگات‌های سیاه رنگ ۰/۲۸ درصد و در سایر آگات‌ها ۰/۰۰۱ درصد است. مقدار نیکل در آگات

چنانکه از شکل ۶ نیز پیداست، نمودار REEs حالت زیگراگ با روند کلی کاهش از LREEs به MREEs (به عبارتی از La تا Dy) را نشان می‌دهد. مقدار La در آگات‌های با رنگ‌های متنوع متفاوت است، به طوری که آگات‌های سیاه‌رنگ بیشترین مقدار و آگات‌های قرمز رنگ کمترین مقدار La را نشان می‌دهند. مقدار La آگات‌های با رنگ‌های دیگر نیز بین این دو مقدار قرار می‌گیرد. همین رفتار در Ce, Pr, Nd, Gd نیز دیده می‌شود، در حالی که تمام آگات‌ها با انواع رنگ‌های مختلف مقادیر کاملاً یکسانی از Sm, Eu, Dy را نشان می‌دهند. شاید بتوان گفت که عناصر Sm, Eu, Dy در تولید رنگ در آگات‌های منطقه‌ی میانه نقشی ندارند؛ در حالیکه عناصر نادر خاکی دیگر می‌توانند احتمالاً در رنگ دهی به آگات‌ها مؤثر باشند.

علیرغم اینکه عامل اصلی رنگ‌دهی در آگات‌ها عناصری مانند Ti, V, Cr, Fe, Cu و غیره هستند، بررسی‌ها نشان داده که در برخی موارد عناصر کمیاب و فرعی نیز در ایجاد رنگ مؤثرند. برای مثال در بررسی ژادئیت‌ها و آمفاسیت‌های آبی رنگ در دنیا وجود  $TiO_2$  عامل اصلی ایجاد رنگ آبی به جای رنگ سبز یشمی شناخته شده است (برای مثال آمفاسیت آبی رنگ گواتمالا [۱۵]). در حالی که در ژادئیت‌های آبی رنگ جنوب ایران  $TiO_2$  عامل ایجاد رنگ آبی نیست، بلکه عناصر فرعی و نادر رنگ آبی را ایجاد کرده‌اند [۱۶].

سیاهرنگ (۳۲ ppm) کمی بالاتر از آگات‌های دیگر (۳۰ ppm) است [۴]. مقدار تیتانیم تغییر مشخصی در آگات‌های مختلف ندارد، ولی مقدار کبالت از آگات‌های به رنگ روشن به سمت آگات‌های تیره رنگ کاهش می‌یابد. تأثیر مس در رنگ آگات مهم است. میانگین مقدار مس در آگات‌های آبی رنگ ۱۰۰ ppm، در آگات‌های قرمز، سبز و دودی ۲۵ ppm و در آگات سیاهرنگ ۱۸ ppm است، لذا می‌توان گفت که عامل اصلی در ایجاد رنگ آبی در آگات‌های میانه که رنگ غالب نیز هست، عنصر مس است. مقدار کروم در آگات‌های سیاهرنگ ۲۰ ppm و در سایر نمونه‌ها ۱۶ ppm است. بالا بودن مقادیر اورانیوم و توریوم در آگات سیاهرنگ می‌تواند نشانه‌ای از تأثیر پذیری این آگات‌ها در اثر تابش مواد رادیواکتیو باشد [۸]. سایر عناصر کمیاب دارای تغییرات مشخصی در نمونه‌ها نیستند.

#### رنگ آمیزی گرمایی آگات‌های میانه

پاره‌ای از کانی‌های با ارزش کمتر به دلیل نامرغوب بودن رنگ، دارای ارزش گوهری پائینی هستند که می‌توان با رنگ‌آمیزی مصنوعی، ارزش اقتصادی آنها را افزایش داد. رنگ‌آمیزی مصنوعی کانی‌ها و سنگ‌های با ارزش کمتر عموماً به یکی از سه روش گرما دادن، استفاده از محلول‌های شیمیایی و تاباندن پرتو رادیواکتیو [۸] صورت می‌گیرد.

عامل اصلی در تغییر رنگ گوهرها در اثر گرما به توزیع دوباره‌ی مولفه‌های رنگ‌ساز در بافت آنها بستگی دارد. برای بهبود کیفیت رنگ آگات‌های میانه ۱۵ نمونه از مناطق مختلف پس از تراش، رنگ‌آمیزی گرمایی شدند. رنگ اولیه آگات‌ها به صورت آبی، نارنجی، قرمز، بی رنگ، سیاه، آبی روشن، خاکستری تیره، شیری و عسلی است [۱۸].

برای گرما دادن نمونه‌ها از کوره‌ی الکتریکی مجهز به ترموکوپل دیجیتالی گرمایی استفاده شد. این کار در ۵ مرحله صورت گرفت و در هر مرحله نمونه‌ها به ترتیب در دماهای ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفتند [۴]. این گرمادهی پنج روز ادامه داشت و پس از هر مرحله گرمادهی از هر یک از نمونه‌ها عکس‌برداری شد. نتایج حاصل از این روش به قرار زیرند:

در دمای ۳۰ تا ۳۰۰°C رنگ پاره‌ای از آگات‌های آبی (گروه اول)، روشن‌تر شده در حالی که رنگ آگات‌های نارنجی، قرمز و سیاه (گروه دوم) تیره‌تر می‌شود. در دمای ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد گروه اول روشن‌تر شده، و به سمت رنگ‌های قهوه‌ای روشن متمایل می‌شوند، ولی آگات‌های گروه دوم تیره‌تر می‌شوند. نکته‌ی جالب اینکه تغییرات رنگ در آگات‌ها منطبق بر نوارهای داخلی آنها بوده و تقریباً هیچ وقت تغییرات رنگ، نوارهای کلسدونی را قطع نمی‌کنند، مگر اینکه ریزدرزه‌های پنهان در ساختار نمونه‌ها این روند را از قبل قطع کرده باشند که در این حال مسیر گسترش درزه‌ها دستخوش پدیده‌ی پررنگ‌شدگی می‌شود [۴]. حد فاصل ۴۰۰ تا ۵۰۰°C رنگ‌های پیازی و گلی در نمونه‌های قرمز و نارنجی ظاهر می‌شوند که بسیار خوشرنگ‌تر از رنگ اولیه آنهاست، لذا برای رنگ‌آمیزی گرمایی آگات‌های با رنگ قرمز و نارنجی منطقه‌ی میانه می‌توان دمای ۵۰۰°C را پیشنهاد کرد [۱۸]. نمونه‌های با رنگ‌های تیره آرام آرام به سمت روشن‌تر شدن پیش می‌روند. بین دماهای ۵۰۰ تا ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد آگات‌های اولیه آبی رنگ با حفظ حالت نواربندی به صورت قهوه‌ای کاملاً خوشرنگ در می‌آیند؛ لذا می‌توان دمای ۵۵۰°C را برای رنگ‌آمیزی آگات‌های با رنگ آبی روشن در منطقه میانه پیشنهاد کرد [۱۸]. در این دما آگات‌های با رنگ تیره نیز کمی روشن‌تر می‌شوند. در ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد رنگ قهوه‌ای آگات‌ها دوباره به سمت تیرگی متمایل می‌شوند که رنگ‌های مناسبی به نظر نمی‌آیند. با توجه به اینکه در دمای ۶۰۰°C در اثر انبساط ناشی از گرما، آگات‌ها از محل درزه‌های میکروسکوپی گسیخته می‌شوند لذا گرمادهی بیشتر نمونه‌ها مناسب به نظر نمی‌رسد [۴].

#### بحث و برداشت

ولکانیسم بسیار گسترده‌ی اسیدی به صورت ریولیت، ایگنیمبریت، ریوداسیت و تراکیت در ائوسن پایانی و آغاز الیگوسن در منطقه‌ی میانه باعث کانی‌سازی قابل توجه آگات در این سنگ‌ها شده است. این ماگماتیسم دارای سرشت آهکی - قلیایی تا شوشونیتی است. مهمترین مناطق آگات‌دار میانه، روستاهای ماوی، زرنجین، وهیل، داش‌قلعه‌سی، قیز قلعه -

[۳] حاج‌علیلو ب، "گوهرشناسی"، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۳۳۶ صفحه (۱۳۸۶).

[۴] حاج‌علیلو ب، "اکتشاف مقدماتی کانیه‌ها و سنگهای نیمه قیمتی در استان آذربایجان شرقی"، طرح پژوهشی دانشگاه پیام نور، ۲۰۵ صفحه (۱۳۸۶).

[۵] نبوی م.ح، "دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۰۹ صفحه (۱۳۵۵).

[۶] آقائباتی س.ع، "نقشه زمین‌شناسی آذربایجان"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۵.

[7] Hajalilou B., Vusuq B., "Comparison of metallogenic characteristics between Alborz (Tarom-Hashjin, NW Iran) and Azerbaijan-Lesser Caucasus, 6<sup>th</sup> EUREGEO", Munich, Bavaria, Germany, 9-12 June, p. 195-196 (2009).

[8] Hurlbut C.S., Kammerling R.S., "Gemology, John Wiley & Sons", New York, 336pp (1991).

[9] Bauer J., "A field guide in color to minerals, rocks and precious stones", Artia, Prague, 208pp (1977).

[10] Götze J., Tichomirova M., Fuchs H., Pilot J., Sharp Z.D., "Geochemistry of Agates", Chemical geology, 175, p. 523-541 (2000).

[۱۱] حاج‌علیلو ب، و ثوق ب، "خاستگاه زمین‌شناسی آگاتهای میانه (آذربایجان)"، دومین همایش تخصصی زمین‌شناسی دانشگاه پیام‌نور کشور، ۱۶-۱۷ اردیبهشت، تبریز (۱۳۸۷) ص ۱۳۹-۱۴۲.

[12] Hajalilou B., Vusuq B., "Gemological Potentials of East Azerbaijan Province, NW of Iran", 63<sup>rd</sup> Geological Kurultai of Turkey, MTA, Ankara, Turkey, 5-9 April (2010).

[۱۳] حاج‌علیلو ب، و ثوق ب، "تنوع بافتی و ساختی در آگاتهای جنوب شرق آذربایجان"، دومین همایش تخصصی زمین‌شناسی دانشگاه پیام‌نور کشور، ۱۶-۱۷ اردیبهشت، تبریز (۱۳۸۷) ص ۱۳۴-۱۳۸.

[14] Boynton W.V., "Geochemistry of the rare earth elements; meteorite studies.", In: Henderson P.(ed.), Geochemistry. Elsevier, p.63-114 (1984).

سی و ولستان است. تنوع ساخت در آگات‌های میانه مشهود است و بیانگر شرایط متفاوت در پر شدن حفره‌های سنگ‌ها از ژل‌های سیلیسی است. بافت‌های نواری و رشته‌ای از مهمترین بافت‌های مشاهده شده در آگات‌های میانه است.

آزمایش‌های گوهرشناسی نشان می‌دهند که آگات‌های منطقه از نظر صیقل‌خوری در حد بسیار خوب و عالی است. وجود رنگ‌های متنوع مثل آبی نیلی، آبی آسمانی، خاکستری، قرمز، نارنجی، دودی سبز و سیاه در آگات‌های این منطقه ناشی از تغییرهای جزئی در عناصر ایجاد کننده رنگ (آهن، منگنز، مس، کرم، کبالت، نیکل) در ترکیب ژل‌های سیلیسی است. بررسی رفتار اکسیدهای اصلی نسبت به سیلیس، رابطه‌ی معنی‌داری را بین مقدار اکسید آلومینیم و مواد فرار نمونه‌ها با مقدار سیلیس نشان می‌دهد. بررسی رفتار عناصر کمیاب نشان داد که عناصر فرعی نیز احتمالاً می‌توانند عامل ایجاد رنگ در آگات‌های میانه باشند. همچنین بیهنجاری مثبت Eu و منفی Ce می‌تواند بیانگر این باشد که شاره‌ی کانی‌ساز مؤثر در حمل و تشکیل سیلیس احتمالاً محصول جدایی نهایی ماگماست.

رنگ‌آمیزی گرمایی نشان داد که بهترین دما برای رنگ‌آمیزی آگات‌های قرمز، نارنجی و بی‌رنگ، ۵۰۰ درجه ی سانتی‌گراد و برای آگات‌های با رنگ آبی ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است.

#### قدردانی

از آقایان دکتر محسن مؤید، مهندس فاضل خالقی و مهندس ایوب قدیرزاده برای مشورتهای علمی سپاسگزاری می‌شود. از شرکت کانساران بینالود برای انجام آنالیزهای شیمیایی، آقایان مرسل محرمی و محبوب نوری برای تراش نمونه‌های آگات تشکر می‌کنیم.

#### مراجع

[۱] مهندسین مشاور کان ایران، "اکتشاف گوهرهای قیمتی در ایران"، وزارت صنایع و معادن، ۳۱۵ صفحه (۱۳۷۹).

[۲] ادیب د، "جهان جواهرات، کلیات جواهرشناسی"، انتشارات یادواره اسدی، تهران، ۳۶۲ صفحه (۱۳۷۴).

Geochimica et Cosmochimica Acta, 44, p973-980(1980).

[۱۸] حاج علیلو ب.، وثوق ب.، "تحلیلی بر علل تنوع رنگ در آگاتهای منطقه میانه"، دومین همایش تخصصی زمین شناسی دانشگاه پیام نور کشور، ۱۶-۱۷ اردیبهشت، تبریز (۱۳۸۷) ص ۹۸-۱۰۲.

[15] Harlow G. E., Quinn E.P., Rossman G. R., Rohtert W. R., "Blue omphacite from Guatemala", *Gems & Gemology*, 40, p.68-70(2004).

[16] Oberhansli R., Bousquet R., Moinzade H., Moazzen M., Arvin M., "The field of stability of blue jadeite, a new occurrence of jadeitite at Sorkhan", Iran, as a case study, *The Canadian Mineralogists*, 45, p.1501-1509(2007).

[17] Morgan J. W., Wandless G. A., "Rare earth element distribution in some hydrothermal minerals.:", evidence for crystallographic control: