

ویژگی‌های کانی‌شناسی، ژئوشیمی، گوهرشناسی و علل تنوع رنگ در آگات‌های میانه، شمال‌غرب ایران

بهزاد حاج علیلو^{۱*}، بهرام وثوق^۱، محسن مؤذن^۲

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 آتشفسانی اسیدی اؤسن به شکل پرکننده حفره‌ها رخ داده است. این سنگ‌های آتشفسانی دارای ماهیت پتاسیک تا شوشوونیتی بوده و به کمان‌های آتشفسانی و قوس‌های پس از برخورد وابسته‌اند. سنگ‌های درونگیر آگات‌ها بیشتر از ایگنیمیریت و رویولیت تشکیل شده‌اند. رنگ‌های آبی، قرمز، نارنجی، خاکستری، سبز و سیاه، ساختارهای ستاره‌ای، گل‌کلمی، 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 است. نمونه‌ها صیقل‌خوری و شفافیت خوبی دارند. سختی آن‌ها ۶/۷ تا ۷/۶ است. چگالی در حدود ۲,۶۴، فاقد خاصیت چندرنگی و فلورسانسی‌اند. از نظر ژئوشیمیایی، آلومینیم و مواد فرار کاهاش 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 ۵۰۰°C و آگات‌های آبی روشن و تیره ۵۵۰°C است.

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

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 گوهرشناسی آگات‌های

مقدمه

همیت 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 می‌رond. تجارت سنگ‌ها و کانی‌های ارزشمند و کم ارزش پس از تجارت اسلحه و مواد مخدّر، پرسودترین تجارت دنیا محسوب می‌شود [۱]. شواهد تاریخی نشانگر منزلت گوهرشناسی نزد ایرانیان بوده و دانشمندانی مثل ابو ریحان بیرونی، ابوعلی‌سینا و خواجه نصیرالدین طوسی دارای تألیفات

*نویسنده مسئول، تلفن - نامبر: ۰۴۱۱ ۵۴۳۲۹۲۶، پست الکترونیکی: hajalilou@pnu.ac.ir

تناوب جریان‌های گدازه‌ای آندزیتی، بازالتی و تراکی آندزیتی با لایه‌های متناوب لیتیک توف، توف ماسه‌ای، توف برشی و توف شیشه‌ای است. گذر فعالیت‌های آتشفشنای اوسن زیرین و میانی به الیگوسن به صورت ظاهر سنگ‌های ایگنیمیریتی، ریولیتی، تراکیتی و توف برشی است که روی مجموعه اوسن 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 رشتمنی و گروه کلسیدونی وابسته است. آگات معمولاً از نوارهای پی‌درپی کلسیدونی 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 (SiO_2) است. برای تشکیل کانی‌های گروه کلسیدونی 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 مأkmای در حال سرد شدن و انباست 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 کالسیدونی از محلول‌های غنی از سیلیس بستگی به عواملی چون کاهش دما و فشار، تغییرات Eh و pH دارد. سیلیس کلئوئیدی 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 رشتهدی (کالسیدونی) در درون آن‌ها سرد شده و در نتیجه آگات تشکیل می‌شود.

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

منطقه‌ی میانه مورد بحث قرار گیرد. این مقاله اولین مقاله‌ای 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، محدب، 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 کانسaran بینالود مورد بررسی قرار گرفتند. حد تشخیص این دستگاه برای عناصر رنگ‌دار مثل مس، کرم، تیتان، منگنز و کبالت تقریباً 1 ppm بوده است. بهمنظور 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، حادث زیادی را پشت سر گذاشته است که آثار آن از پرکامبرین (زمین‌های دگرگونی میانه) تا امروز (ولکانیسم فعالیت‌های آتشفشنای سبلان و سهند) قابل مشاهده‌اند. با توجه به نقشه‌ی زمین‌شناسی آذربایجان (شکل ۱) بخش بزرگ آن به وسیله‌ی رسوب‌های ترشیری، سنگ‌های آتشفشنای و توده‌های نفوذی پوشیده شده است [۶].

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

۳) روستای وهیل در ۳۵ کیلومتری شمال‌شرقی میانه قرار دارد. این محل در منتهی الیه جنوب غربی ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰ کوثر واقع شده است. سنگ‌های آگات‌دار این منطقه بیشتر تراکیت و تراکی آندزیت با سن الیگوسن هستند که روی توفهای خاکستری و سبز اثوسن قرار گرفته‌اند. گسترش ریولیت و ایگنیمیریت در این منطقه بسیار کم است.

۴) منطقه‌ی داشقلعه‌سی در ۳۸ کیلومتری شرق میانه، (بخش شمال‌غربی ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰ هشت‌جین)، قرار دارد. سنگ‌های آگات‌دار این منطقه شامل تراکیت و تراکی آندزیت است که بدلیل دگرسانی به شدت متلاشی شده و نمونه‌های آگات در سطح خاک‌های منطقه رها شده‌اند. این سنگ‌ها روی واحدهای توفی اثوسن قرار گرفته‌اند.

۵) منطقه قیز قلعه‌سی که در ۲۰ کیلومتری جنوب‌شرق شهرستان میانه، در بخش جنوبی قافلانکوه، و در کنار جاده‌ی میانه-تهران قرار دارد. این منطقه در ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰ واقع شده است. در این منطقه شاهد گسترش بسیار زیاد سنگ‌های ریولیتی و ایگنیمیریتی الیگوسن با ساخت جریانی هستیم (شکل ۲ الف)، که روی توفهای اثوسن و در زیر مارنهای گچ‌دار میوسن قرار گرفته‌اند.

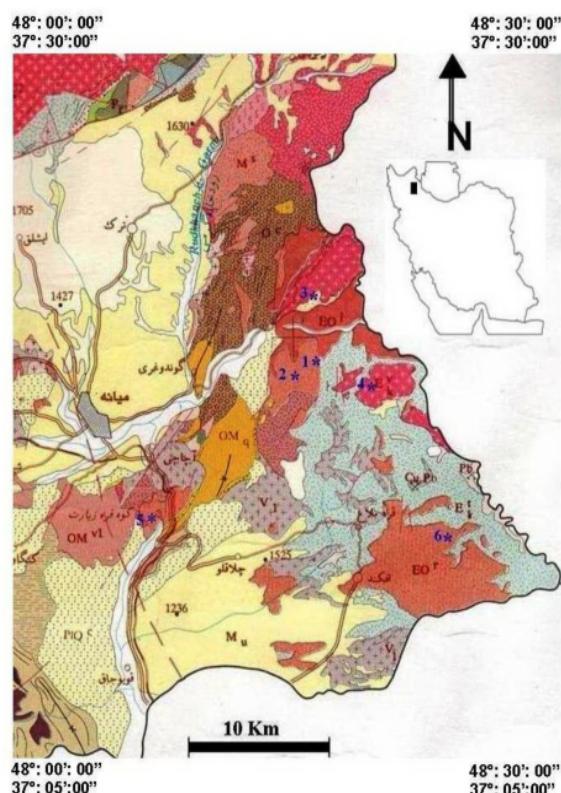
گوهرشناسی در آگات‌ها می‌شود. در زیر به مهم‌ترین ویژگی‌های زمین‌شناسی و گوهرشناسی آگات‌های میانه اشاره می‌شود.

تقریباً تمام رخمنون‌های 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 گستردگی از سنگ‌های آگات‌دار هستیم (شکل ۱)، که عبارتند از [۴]:

(۱) روستای ماوی که در ۲۴ کیلومتری شمال‌شرق آق‌کند (مرکز بخش کاغذکنان) و در منتهی الیه شمال‌غربی ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰ هشت‌جین قرار دارد. سنگ‌های آگات‌دار در این منطقه به صورت گدازه‌های ریولیتی، ریوداسیتی و ایگنیمیریتی با سن الیگوسن اند که روی ویتریک توفها و لیتیک توفهای اثوسن قرار گرفته‌اند.

(۲) روستای زرنجین که در ۵ کیلومتری غرب روستای ماوی، ۳۰ کیلومتری شرق میانه و در منتهی الیه شمال‌شرقی ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰ میانه قرار دارد. در این منطقه شاهد گسترش سنگ‌های ایگنیمیریتی و ریولیتی الیگوسن هستیم که روی توفهای سبز و لیتیک توفهای اثوسن قرار داشته و دارای آگات فراوانند.

	Q ^{al} . Recent alluvium	Q ^t . Young traces
Pl. Quat.	PLQ ^c . Moderately consolidated conglomerate	
	Q ¹²	
	M ^{ms} . Red marl with sandstone	
	PIQ ^c	
	M ^s . Red sandstone	
Pl. Ocene	OM ^q . Light gray massive limestone (Qom Form)	
Ocene	OM ^{vI} . Lava breccia, mainly dacitic	
	OM ^{vI} . Basalt, andesite and trachyandesite	
Miocene	O ^c . Conglomerate, sandstone and siltstone (LRF)	
	OM ^{y2}	
	OM ^{y1}	
	Eo ^r . Brown - weathered rhyolite, trachyte trachyandesite	
Oligocene	O ^c	
	Eo ^r [Eo ¹]	
Eocene	Eo ¹ . Latite and andesite	
	E ^v	
	E ^v . Volcanites, mainly andesite and associated intermediate rocks	
	E ^t	
	E ^t . Green tuff and tuffaceous shale (Karaj Form)	
	V _k	
	V _l . Porphyritic latite, rhyolite	
	Rail way	* : Sample location
	Road	



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی و پراکندگی مناطق آگات‌دار میانه (با مقیاس تقریبی ۱:۵۰۰۰۰) (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی آذربایجان [۶]).



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

محلول‌های اشباع از سیلیس در شکاف‌ها و حفره‌های سنگ‌هاست [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 به‌وسیله کالسدونی و بخش‌های درونی‌تر به‌وسیله کواتز درشت‌بلور [۱۳] پر شده است. به‌نظر 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

روستای ولستان که در ۱۸ کیلومتری شمال شرقی آق‌کند (مرکز بخش کاغذکنان) و تقریباً در بخش میانی ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰ هشت‌جین واقع شده است. گسترش سنگ‌های ریولیتی و ایگنیمیریتی آگات‌دار به سن الیگوسن با ساخت جریانی در این منطقه زیاد است (شکل ۲ ب). این سنگ‌ها روی توف‌های سبز و خاکستری انسن قرار دارند [۱۲].

ساخت آگات‌های میانه

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



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 رشته‌ای بلورهای بسیار ریز کوارتز که به تدریج به کوارتزهای درشت بلور تبدیل می‌شوند و بافت نواری از سرد شدن سریع ژلهای سیلیسی در دیوارهای حفره‌ها و سرد شدن آرام آنها در بخش‌های داخلی تر حفره‌ها به وجود آمده‌اند [۴].

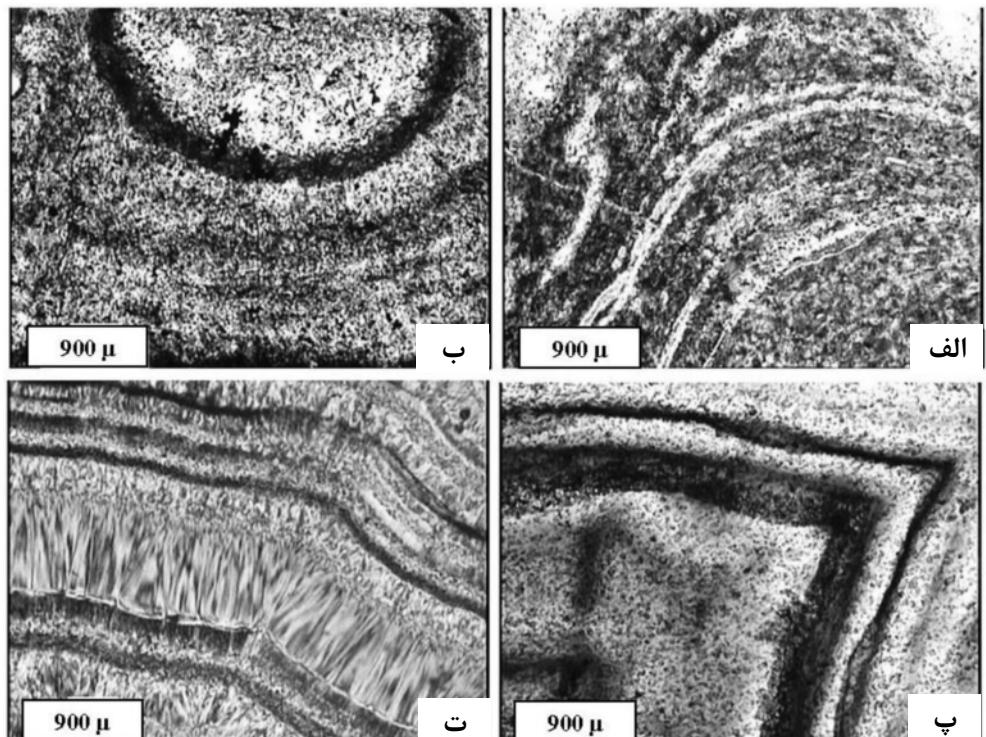
ویژگی‌های گوهرشناصی آگات‌های میانه

به منظور بررسی ویژگی‌های گوهرشناصی آگات‌های میانه اقدام به تراش مدور، زاویه‌دار و اندازه‌گیری برخی از ویژگی‌های گوهرشناصی مثل صیقل خوری، ضربی شکست، خاصیت فلوبئرانی، 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 گوهرشناصی 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 همیگر 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 درپی فاز سیلیکاتی به صورت سریع (کالسدونی) و آرام (کوارتزهای درشت‌بلور) و فاز کربناتی (کلسیت) از محلول‌های گرمابی 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 اسفلولیتی (شکل ۴ ب) مهمترین بافت‌های مشاهده شده در سنگ‌های ایگنیمیریتی، ریولیتی و پیرومریتی آگات‌دار منطقه میانه است [۴].



شکل ۴ بافت‌های میکروسکوپی در سنگ‌های ایگنیمیریتی و آگات‌های منطقه‌ی میانه: (الف) بافت جریانی (ppl) (ب) بافت اسفلولیتی (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	صفی	صفی	خوب	۷	۲,۶۶	-	-	۱,۵۵	خوب	عالی
سفید	آبی کمرنگ	صفی	صفی	متوسط	۶,۸	۲,۶۳	-	-	۱,۵۴	متوسط	خوب
خاکستری کمرنگ	سیاه	صفی	صفی	متوسط	۷	۲,۶۵	-	-	۱,۵۵	خوب	خیلی خوب
سفید	خاکستری	صفی	صفی	واکسی	۷	۲,۶۴	-	-	۱,۵۳	خوب	خوب
سفید	نارنجی کمرنگ	صفی	صفی	واکسی	۶,۷	۲,۶۶	-	-	۱,۵۵	خوب	خیلی خوب
سفید	نارنجی کمرنگ	صفی	صفی	واکسی	۷	۲,۶۵	-	-	۱,۵۴	خوب	خیلی خوب
											ولستان

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. هم‌مان 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 کندریت 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 نتیجه‌گیری کرد.

ژئوشیمی

برای بررسی ترکیب شیمیایی آگات‌های میانه و نیز شناخت تأثیر عناصر رنگزا (آهن، مس، منگنز، کروم، تیتانیم؛ نیکل و کбалت) در این آگات‌ها، هشت نمونه به آزمایشگاه XRF شرکت کانسaran 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 (نمونه-۳۵a، ۳۵b، ۳۵c، ۳۲)، یک نمونه به رنگ سبز (نمونه-۳۵d)، یک نمونه به دودی (نمونه-۳۶a)، یک نمونه به قرمز (نمونه-۳۶b) و یک نمونه به آگات سیاه‌رنگ (نمونه-۴۰). وابسته بودند مقدار SiO_2 کلیه‌ی نمونه‌ها بین ۹۷,۵ تا ۹۸,۵ درصد براورد شدند.

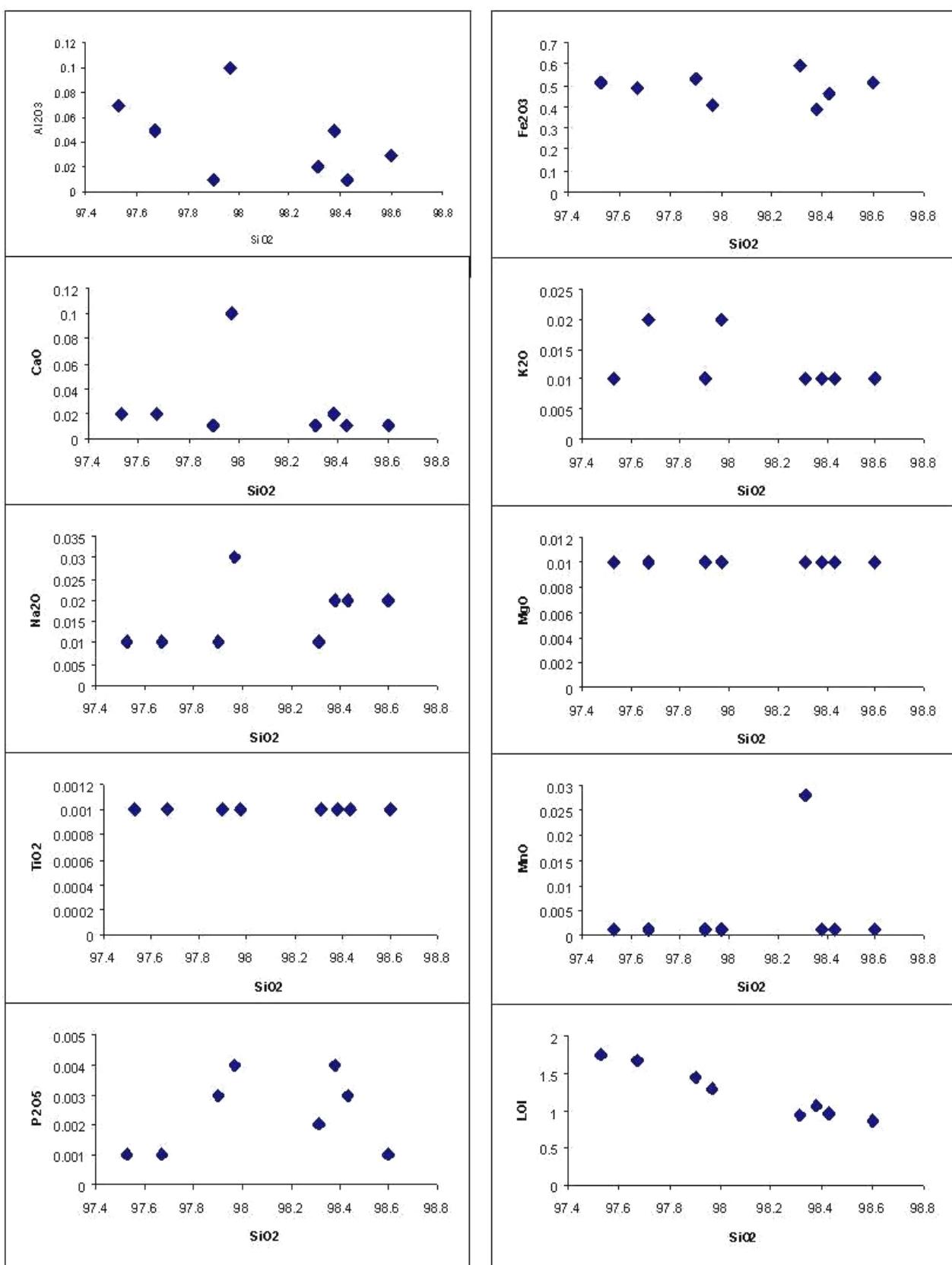
به منظور بررسی رفتار ژئوشیمیایی اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و کمیاب در آگات‌های مناطق مختلف میانه و نیز شناخت ارتباط ژنتیکی بین این آگات‌ها، نمودارهای تغییرات اکسیدهای اصلی نسبت به سیلیکا و نمودارهای عنکبوتی ترسیم و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند.

اکسیدهای اصلی

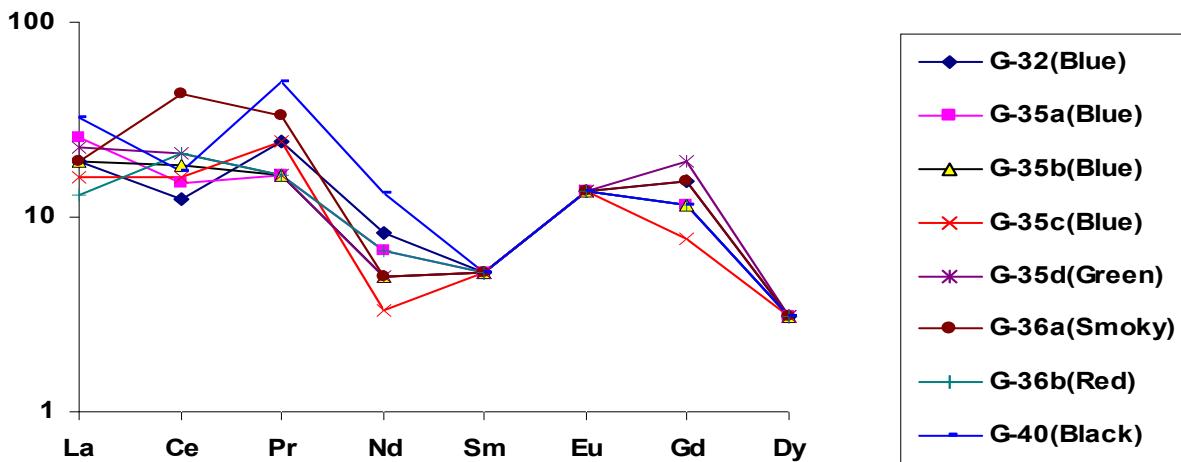
برای بررسی تغییرات اکسیدهای اصلی (جدول ۲) نسبت به سیلیکا از نمودارهای دو مؤلفه‌ای تغییرات سیلیکا نسبت به اکسیدها استفاده شد (شکل ۵). تغییرات مقدار اکسیدهای کلسیم، سدیم، پتاسیم و آلومینیوم دارای روند مشخصی است،

جدول ۲ نتایج تجزیه‌ی شیمیایی ۸ نمونه از آگات‌های منطقه‌ی میانه.

اکسیدهای اصلی (%)	G-32 (Blue)	G-35a (Blue)	G-35b (Blue)	G-35c (Blue)	G-35d (Green)	G-36a (Smoky)	G-36b (Red)	G-40 (Black)
SiO ₂	۹۷,۹۷	۹۷,۶۷	۹۸,۳۸	۹۰,۹۰	۹۸,۶۰	۹۸,۴۳	۹۷,۵۳	۹۸,۳۱
Al ₂ O ₃	۰,۱۰	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۱	۰,۰۳	۰,۰۱	۰,۰۷	۰,۰۲
Fe ₂ O ₃	۰,۴۱	۰,۴۹	۰,۳۹	۰,۵۳	۰,۵۱	۰,۴۶	۰,۵۱	۰,۵۹
CaO	۰,۱۰	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱
Na ₂ O	۰,۰۳	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱
K ₂ O	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱
MgO	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱
TiO ₂	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱
MnO	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۲۸
P ₂ O ₅	۰,۰۰۴	۰,۰۰۱	۰,۰۰۴	۰,۰۰۳	۰,۰۰۱	۰,۰۰۳	۰,۰۰۱	۰,۰۰۲
L.O.I	۱,۲۸	۱,۸۱	۱,۰۶	۱,۴۵	۰,۸۵	۰,۹۵	۱,۷۵	۰,۹۳
عناصر (ppm) فرعی								
Cl	۱۰	۱۲	۱۵	۱۴	۱۲	۱۰	۱۰	۱۵
S	۲۰	۲۵	۳۰	۳۴	۲۰	۲۵	۳۳	۲۰
Ba	۲۰	۲۵	۵۴	۲۶	۲۷	۱۵	۲۰	۸۹
Sr	۲۰	۱۵	۱۴	۱۰	۱۵	۱۳	۲۰	۲۲
Cu	۴۹	۴۴	۳۲۵	۴۲	۲۶	۲۴	۲۸	۱۸
Zn	۱۸	۱۵	۱۱	۱۳	۱۱	۱۵	۱۹	۲۱
Pb	۸	۲	۳۰	۵	۷	۲۷	۶	۳۵
V	۱۳	۱۱	۱۴	۱۴	۱۲	۱۳	۱۵	۱۳
W	۶	۵	۶	۳	۴	۵	۷	۴
Mo	۱<	۱<	۱<	۱<	۱<	۱<	۱<	۱<
Nb	۲	۵	۳	۴	۶	۳	۹	۲
Zr	۳۲	۳۲	۵۱	۳۴	۳۰	۳۵	۳۲	۳۰
Y	۸	۱۱	۱۶	۱۳	۱۲	۱۳	۱۱	۱۲
Rb	۵	۵	۴	۳	۶	۶	۴	۴
Ni	۳۱	۳۱	۲۵	۳۱	۳۰	۳۰	۳۱	۳۲
Cr	۱۰,۴	۲۱	۱۶	۱۷	۱۷	۱۵	۱۵	۲۰
Co	۴	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱
U	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲
Th	۲	۲	۱	۲	۲	۳	۳	۵
La	۶	۸	۶	۵	۷	۶	۴	۱۰
Ce	۱۰	۱۲	۱۵	۱۳	۱۷	۳۵	۱۷	۱۴
Pr	۳	۲	۲	۳	۲	۴	۲	۶
Nd	۵	۴	۳	۲	۳	۳	۴	۸
Sm	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
Eu	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
Gd	۴	۳	۳	۲	۵	۴	۲	۳
Dy	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱



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



شکل ۶ مقادیر بهنجار شده ترکیب شیمیایی آگات‌های میانه بر حسب رنگ آن‌ها به کندریت [۱۴].

بی هنجاری مثبت Eu شاید بتواند توجیه‌گر تغییرات دمایی گستردۀ در مagma مولد گرماب تولید کننده آگات باشد. علاوه بر این غنی شدگی Eu نشانگر تشکیل شاره‌ی کانه (شاره‌های مولد آگات) به عنوان محصول نهایی یک magma جدایشی یافته است. اگر شاره‌ی کانه‌زا محصول جدایشی یک magma 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 میکروسکوبی آنها، وجود نفوذی‌های مایع، جامد گاز و به ویژه حضور عناصر فلزی رنگ‌زا مثل آهن، کروم، مس، تیتانیم، منگنز، کبات 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،۰۲۸ 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 کاهشی 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 رنگ-های 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].

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 کلسیونی را قطع نمی‌کنند، مگر اینکه ریزدرزه‌های پنهان در ساختار نمونه‌ها این روند را از قبل قطع کرده باشد که در این حال مسیر گسترش درزه‌ها دستخوش پدیده‌ی پر رنگ‌شده‌گی می‌شود [۴]. حد فاصل ۴۰۰ تا ۵۰۰°C رنگ‌های پیازی و گلی در نمونه‌های قرمز و نارنجی ظاهر می‌شوند که بسیار خوشنگ‌تر 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 خوشنگ 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 گرمایی، آگات‌ها از محل درزه‌های میکروسکوپی گسیخته می‌شوند لذا گرمادهی بیشتر نمونه‌ها مناسب به نظر نمی‌رسد [۴].

بحث و برداشت

ولکانیسم بسیار گستردگی اسیدی به صورت ریولیت، ایگنیمبریت، ریوداسیت و تراکیت در ائوسن پایانی و آغاز الیگومن در منطقه‌ی میانه باعث کانی‌سازی قابل توجه آگات در این سنگ‌ها شده است. این ماقم‌اتیسم دارای سرنشت آهکی-قلایی تا شوشنیتی است. مهمترین مناطق آگات‌دار میانه، روستاهای ماوی، زرنجین، وهیل، داش‌قلعه‌سی، قیز قلعه-

سیاهرنگ (۳۲ ppm) کمی بالاتر از آگات‌های دیگر (۳۰ ppm) است [۴]. مقدار تیتانیم تغییر مشخصی در آگات‌های مختلف ندارد، ولی مقدار کبات 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.

رنگ‌آمیزی 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 تابانیدن 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، سبز، سیاه، آبی روشن، خاکستری تیره، شیری و عسلی است [۱۸].

برای گرما دادن نمونه‌ها از کوره‌ی الکتریکی مجهز به ترموموپل 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:

- [۳] حاجعلیلو ب، "گوهرشناسی"، انتشارات دانشگاه پیام نور، صفحه ۳۳۶ (۱۳۸۶).
- [۴] حاجعلیلو ب، "اکتشاف مقدماتی کانیها و سنگهای نیمه قیمتی در استان آذربایجان شرقی"، طرح پژوهشی دانشگاه پیام نور، صفحه ۲۰۵ (۱۳۸۶).
- [۵] نبوی م.ح، "دبیاجه‌ای بر زمین‌شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، صفحه ۱۰۹ (۱۳۵۵).
- [۶] آقاباتی س.ع، "نقشه زمین‌شناسی آذربایجان"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۵.
- [۷] Hajalilou B., Vusuq B., "Comparison of metallogenetic characteristics between Alborz (Tarom-Hashtjin, NW Iran) and Azerbaijan-Lesser Caucasus, 6th EUREGEO", Munich, Bavaria, Germany, 9-12 June, p. 195-196 (2009).
- [۸] Hurlbut C.S., Kammerling R.S., "Gemology, John Wiley & Sons", New York, 336pp (1991).
- [۹] Bauer J., "A field guide in color to minerals, rocks and precious stones", Artia, Prague, 208pp (1977).
- [۱۰] Götze J., Tichomirova M., Fuchs H., Pilot J., Sharp Z.D., "Geochemistry of Agates", Chemical geology, 175, p. 523-541 (2000).
- [۱۱] حاجعلیلو ب.، وثوق ب.، "خاستگاه زمین‌شناسی آگاتهای میانه (آذربایجان)"، دومین همایش تخصصی زمین‌شناسی دانشگاه پیامنور کشور، ۱۶-۱۷ اردیبهشت، تبریز (۱۳۸۷) ص ۱۴۲-۱۳۹.
- [۱۲] Hajalilou B., Vusuq B., "Gemological Potentials of East Azerbaijan Province, NW of Iran", 63rd Geological Kurultai of Turkey, MTA, Ankara, Turkey, 5-9 April (2010).
- [۱۳] حاجعلیلو ب.، وثوق ب.، "تنوع بافتی و ساختی در آگاتهای جنوب شرق آذربایجان"， دومین همایش تخصصی زمین‌شناسی دانشگاه پیامنور کشور، ۱۶-۱۷ اردیبهشت، تبریز (۱۳۸۷) ص ۱۳۸-۱۳۴.
- [۱۴] 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 صیقل خوری 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، کبات، 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 مانگماست. رنگ‌آمیزی گرمایی نشان داد که بهترین دما برای رنگ‌آمیزی آگات‌های قرمز، نارنجی و بی‌رنگ، ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و برای آگات‌های با رنگ آبی ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است.

قدرتدانی

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 محرومی و محبوب نوری برای تراش نمونه‌های آگات تشکر می‌کنیم.

مراجع

- [۱] مهندسین مشاور کان ایران، "اکتشاف گوهرهای قیمتی در ایران"، وزارت صنایع و معدن، صفحه ۳۱۵ (۱۳۷۹).
- [۲] ادیب د، "جهان جواهرات، کلیات جواهر شناسی"، 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 زمین‌شناسی دانشگاه پیام‌نور کشور، ۱۶-۱۷ اردیبهشت، تبریز (۱۳۸۷) ص ۱۰۲-۹۸

[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: