

بررسی شرایط تشکیل و عوامل رنگزا در مرمراونیکس‌های ایران بر پایه زمین‌شیمی و میانبارهای سیال

آزاده ابراهیمی اردکانی، بهمن رحیم‌زاده*

گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۹/۱۹، نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵)

چکیده: مرمراونیکس‌ها به عنوان یکی از انواع سنگ‌های کربناتی در اثر عملکرد چشمه‌های آبگرم آهک‌ساز، به وجود می‌آیند. تشکیل مرمر در چشمه‌های تراورتنی به صورت درجا و شیمیایی است. این سنگ‌ها از نظر ساخت، بافت و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متفاوت از سایر مرمره‌های دارای خاستگاه دگرگونی هستند، در این پژوهش، این دو نوع سنگ از نظر واژه‌شناسی از هم تفکیک شده و سپس شرایط تشکیل مرمر در چشمه‌های تراورتنی بررسی شده است. کنار هم بودن سنگ‌های آتشفشانی جوان و گسل‌های متعدد با نهشته‌های تراورتن و اونیکیس منطقه نشانگر عملکرد مؤثر همزمانی فعالیت ماگمایی و زمین ساخت پلیوکواترنری در تشکیل این ذخایر ارزشمند است. در این پژوهش مناطق قروه، نقده، بورق و آذرشهر از نظر موارد یاد شده بررسی شده‌اند. تعیین غلظت عناصر خاکی نادر (REE) نمونه‌های انتخابی مرمراونیکس گویای نقش مؤثر این عناصر در رنگزایی با طیف‌های ویژه رنگی است. اکسید آهن مهمترین عنصر رنگزا در مرمراونیکس‌های با طیف رنگی سبز است. بررسی میانبارهای سیال نشان داد که دمای همگن‌شدگی تبدیل بخار به مایع ۲۸۰-۱۳۲ درجه سانتی‌گراد و مقدار شوری نمونه‌ها در گستره ۹۹۸-۲۹۰ درصد وزنی NaCl متغیر است. نتایج این بررسی‌ها نشان دهنده خاستگاه جوی، دگرگونی و آب دریا برای شکل‌گیری سیال کانه‌ساز در نمونه‌های مورد بررسی است. محیط تشکیل نمونه‌های مورد بررسی در گستره کانسارهای فراگرمایی است.

واژه‌های کلیدی: مرمراونیکس؛ پهنه سندانج-سیرجان؛ آتشفشان‌های پلیوکواترنری؛ چشمه تراورتن‌ساز؛ عوامل رنگزا.

مقدمه

شکل‌های مختلف از جمله نواری، سنگال، متراکم و متخلخل است. این سنگ نام خود را از یونان باستان گرفته است و علت این نام‌گذاری رگه‌های زرد و صورتی رنگ آن بوده که یادآور شکل ناخن است. تنها گزارش‌ها و پژوهش‌های معدودی از پایان قرن نوزدهم [۲-۴] و آغاز قرن بیستم [۵] پیرامون ویژگی‌های مرمراونیکس وجود دارد. فورد و پدلی [۶] با بررسی رسوب‌های تراورتن و توفان نتیجه گرفتند که بعضی از اونیکیس-های تزئینی خاستگاه رسوبی مانند تراورتن و غارسنگ‌ها دارند. در گزارش کانسار پوبلا [۷] مرمراونیکس به عنوان رسوب‌های

سنگ‌های کربناتی از عمده‌ترین سنگ‌های ساختمانی و تزئینی محسوب می‌شوند. این سنگ‌ها به دلیل سختی مناسب، قابلیت ساب و برش، تنوع رنگ و بافت، مقاومت خوب، قابلیت استخراج آسان، ممکن نبودن دگرسان شدن و ذخایر بزرگ جایگاه ویژه‌ای در گروه سنگ‌های ساختمانی و تزئینی دارند [۱]. مرمراونیکس نیز مانند تراورتن سنگی متشکل از انباشت کربنات کلسیم به صورت کلسیت و گاهی همراه با آراگونیت (کلسیت کامل، آراگونیت کامل و یا کلسیت-آراگونیت) با

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۷۹۶۵۲۰۰، پست الکترونیکی: B_Rahimzadeh@sbu.ac.ir

با خاستگاه شیمیایی و نوعی تراورتن معرفی شده‌اند. برگ لایه‌های متوسط لایه این سنگ و بافت میکروسکوپی آن، مانند ساخت درخت سروی (Ceder-tree structure) نشانگر خاستگاه تراورتنی این سنگ است [۸].

در واقع مرمراونیکس‌ها به عنوان یکی از انواع سنگ‌های کربناتی در اثر عملکرد چشمه‌های آبگرم تراورتن‌ساز، به وجود می‌آیند. محلول‌های تشکیل شده کربنات کلسیم را در اعماق حل کرده و محلول‌هایی با غلظت بالای بی‌کربنات کلسیم را به وجود می‌آورند که با بالا آمدن آب شروع به گاززدایی می‌کنند. محلول‌های گرمایی اغلب در طول شکستگی‌ها بالا می‌روند [۹]. تشکیل مرمراونیکس در چشمه‌های تراورتنی به صورت درجا و شیمیایی است. این سنگ‌ها از نظر ساخت، بافت و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متفاوت از سایر مرمیریت‌های با خاستگاه دگرگونی هستند. اغلب مرمراونیکس‌ها به صورت میان‌لایه‌های تراورتن دیده می‌شوند. در فرآیند عملکرد چشمه‌های آبگرم، افت دمای آب اگر کند باشد، مرمراونیکس شکل می‌گیرد و اگر سریع صورت گیرد، تراورتن تشکیل می‌گردد [۹]. همه تراورتن‌ها دارای میان‌لایه‌های مرمراونیکس نیستند، به احتمال بسیار نقش فعالیت‌های گرمایی در شکل‌گیری مرمیرهای اونیکس بسیار مهم است و بیشتر این سنگ‌ها با تراورتن‌های دمازادی همراه هستند. بر پایه پژوهش طراح و همکاران [۱۰]، تراورتن‌های تزرچ هرمزگان از نوع دمازادی نبوده و بیشتر کلسیتی و بدون میان‌لایه‌های مرمراونیکس هستند و دلایل احتمالی چون شرایط آب‌وهوایی، کمبود CO_2 ، محیط قلیایی و

دمای پایین آب برای این امر مطرح شده است. از مهمترین معیارهای انتخاب سنگ ساختمانی رنگ آن است. با کمی تغییر در ترکیب شیمیایی و شرایط تشکیل سنگ، رنگ آن تغییر می‌کند و با توجه به تقاضای بازار و سلیقه مردم، ارزش اقتصادی سنگ نوسان فاحشی می‌یابد. یکی از دلایل تنوع رنگی که در مرمراونیکس‌ها وجود دارد، انواع کاتیون‌های رنگزای موجود در آب چشمه‌هاست. در واقع هرچه مقدار کاتیون‌های محلول در آب کمتر باشد، رنگ سنگ نیز روشن‌تر می‌شود. زیبایی چشم‌نواز، تنوع رنگ، قابلیت ساب و صیقل عالی، قابلیت عبور نور، امکان برش در راستاهای موازی و عمود بر لایه‌بندی از جمله ویژگی‌های بی‌مانند مرمراونیکس بوده که این سنگ را در گروه گران قیمت‌ترین سنگ‌های تزئینی قرار داده است. وجود معادن بسیار و غنی از جمله در خراسان (مشهد)، کرمان (ده مریم سیرجان و ده رستم بم)، کردستان (قروه)، آذربایجان شرقی (آذرشهر) و آذربایجان غربی (نقده) سبب تولید گونه‌های نادر و بسیار با کیفیت گردیده است [۱۱]. در این پژوهش خاستگاه مرمیرهای چشمه‌های تراورتنی، عوامل رنگزا، مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها بر پایه بررسی‌های صحرایی، سنگ نگاری، میانبارهای سیال و تجزیه به روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-M) نمونه‌های منتخب، جمع‌بندی و تحلیل نتایج تعیین شده است. در جدول ۱ گزیده‌ای از ویژگی‌های مهمترین سنگ‌های تزئینی کربناتی آورده شده است [۹، ۱۲، ۱۳].

جدول ۱ طبقه‌بندی مهمترین سنگ‌های تزئینی کربناتی.

نام سنگ	خاستگاه	تعریف علمی
تراورتن	رسوبی-زیست-شیمیایی	نهشته‌های رسوبی برآمده از عملکرد چشمه‌های آبگرم آهک‌ساز در مناطق با فعالیت‌های زمین گرمایی بالا و کنار آتشفشان‌های جوان.
مرمراونیکس	رسوبی-شیمیایی	نهشته‌های رسوبی میان‌لایه همراه با تراورتن‌ها ناشی از افت دمای کند چشمه‌های آبگرم آهک‌ساز، چکیدن قطره‌های آب دارای کربنات کلسیم در محل غارها یا حرکت ملایم آب و تبخیر آن در فضای خالی یا روی واحدهای سنگی.
مرمریت	دگرگونی مجاورتی و ناحیه‌ای	نوعی سنگ دگرگونی شامل کلسیت ریز تا درشت بلور و باز تبلور دولومیت (بر حسب درجه دگرگونی) به طوری که اغلب ویژگی‌های سنگ آهک پیشین از بین می‌رود.
سنگ چینی	دگرگونی مجاورتی و ناحیه‌ای	مرمریت درشت بلور، سفید یا خاکستری روشن تا کرم.

روش پژوهش

بازدیدهای صحرایی از دو معدن مجین و یخی کمال (۹۳ کیلومتری شرق سنندج در بخش شمالی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ قروه) به منظور بررسی روابط صحرایی سنگ‌های مرمراونیکس با سنگ‌های همبر و میزبان و نمونه‌برداری انتخابی از واحدهای مختلف بر اساس تنوع بافتی، کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی انجام شد. طی بازدید صحرایی، تعداد ۲۵ نمونه از پی‌سنگ، همبری-های موجود و توالی لایه‌های مختلف سنگی با تأکید بر تنوع رنگ نمونه‌ها انتخاب شدند. به منظور تکمیل تنوع رنگی و گسترش منطقه مورد بررسی برای پژوهش بیشتر و مقایسه بهتر مرمراهای اونیکس، تعداد ۴ نمونه مرمراونیکس تمام آبی قروه، سبز -شفاف بورق (یزد)، شکلاتی نقده و سبز کاهویی آذرشهر نیز به نمونه‌های موجود اضافه شدند. ۱۸ مقطع نازک و ۳ مقطع نازک دوبر صیقل از نمونه‌های مرمراونیکس (سفید یخی کمال، آبی مجین ۲، شکلاتی نقده) در دانشگاه خوارزمی تهران تهیه شد و بررسی‌های سنگ نگاری برای توصیف بافت و اجزا تشکیل دهنده سنگ‌ها در آزمایشگاه دانشگاه شهید بهشتی انجام شد. میانبارهای سیال ۳ مقطع دوبر صیقل در دانشگاه تربیت مدرس به منظور اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی با دستگاه لینکام مدل THMSG600 متصل به میکروسکوپ زایس و مجهز به کنترل کننده دمایی TMS94 و سرد کننده LNP بررسی شدند. تجزیه شیمیایی ICP-MS برای ۷ نمونه سنگی از مناطق آذرشهر، قروه و نقده، به منظور بررسی مقدار عناصر خاکی نادر (REE)، عوامل رنگزا و مقدار H_2O موجود در آن‌ها با توجه به بیشینه تنوع رنگی و کمینه دگرسانی در حالت پودری با دستگاه ICP-MS مدل Agilent 7900 در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شد.

نتایج

زمین‌شناسی

ذخایر عظیم مرمراونیکس و تراورتن ایران در راستای یک نوار طولانی به طول ۳۰۰۰ کیلومتر و عرض متوسط ۱۰۰ کیلومتر با روندی بسیار آشکار از گوشه شمال غربی (ماکو) تا مرز پاکستان قرار دارند. این نوار به علت تعداد آتشفشان‌ها و چشمه‌های آبگرم و فعالیت‌های زمین‌ساختی جوان (پلیوسن تا حال حاضر) به نام «نوار داغ مرمچشمه‌ای و تراورتن سراسری

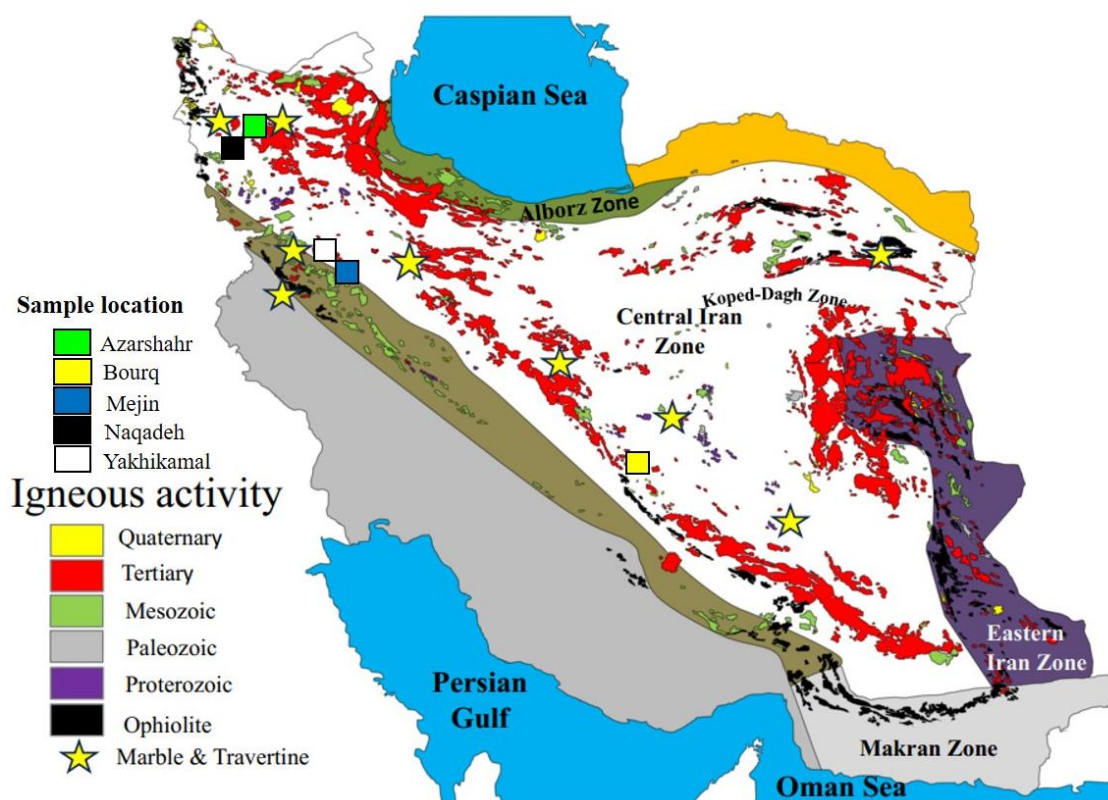
ایران» شهرت یافته است [۱۴]. وجود آتشفشان‌ها، فعالیت‌های زمین‌ساختی جوان، چشمه‌های تراورتن‌ساز و آتشفشان‌های قدیمی، به طور قطع ردیاب‌های بسیار شاخصی برای پی‌جویی گسترده تراورتن هستند [۱۵]. در ادامه شرح مختصری از موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی معادن نمونه‌های مورد بررسی آورده شده است.

معدن مرمراونیکس مجین در ۱۵ کیلومتری شرق قروه، در روستای مجین در فاصله ۱۲۰ کیلومتری سنندج، در کرانه غربی ایران مرکزی و نیمه شرقی پهنه سنندج-سیرجان شمالی واقع است. گستره معدنی مرمراونیکس یخی کمال در شمال شرق نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سنندج در شمال شهر دهگلان قرار دارد. در هر دو معدن، واحد سنگی منطقه که سنگ مادر کانه-زایی مرمراونیکس و تراورتن در منطقه محسوب می‌شود واحد مارنی-آهکی پلیوسن بوده که از ممبرهای سازند قم با سنگ شناسی سنگ آهک رسی، مارن، توف ماسه‌ای، توف لای‌دار، کنگلومرا و تراورتن است، این واحد در نیمه شمالی ورقه گسترش زیادی دارد و با ریختار ویژه (تپه ماهورهای با ارتفاع متوسط) شناخته می‌شود. رنگ آن‌ها اغلب سفید مایل به کرم، نخودی و گاهی قرمز، خاکستری تیره و زرد است. این واحد سنگی منظم‌لایه و دارای شیب بسیار کم (تا ۵ درجه) است و ستبرای تقریبی آن ۴۰۰-۳۰۰ متر برآورد می‌شود. مرز زیرین آن، در خارج از ورقه قروه، به صورت ناپیوسته در ارتباط با سازند قرمز بالایی با سن الیگوسن-میوسن $OM^{S.I}$ (درگزارش نقشه چارگوش سنندج) [۱۶] معرفی شده و مرز بالایی آن، در ورقه قروه با آتشفشان‌های کواترنر پوشیده شده است [۱۷]. معدن مرمراونیکس بورق در ۹۲ کیلومتری غرب استان یزد در بخش دهشیر شهرستان تفت در پهنه ایران مرکزی واقع است، این مرمراونیکس دارای رنگ زمینه سبز با رگه‌های سفید و قهوه‌ای است. تشکیل واحدهای ترارتن و مرمراونیکس در این منطقه همزمان با فعالیت‌های چشمه‌های تراورتن‌ساز از اواخر پلیستوسن آغاز شده و به صورت فازهای مختلف تراورتن‌سازی تا کنون ادامه یافته است [۱۸]. معدن آذرشهر در حدود ۵۰ کیلومتری جنوب‌غربی تبریز و شرق دریاچه ارومیه در پهنه البرز-آذربایجان قرار دارد. تراورتن‌های آذرشهر با میان‌لایه‌های مرمراونیکس در ساحل جنوبی دریاچه ارومیه گسترش

توصیف نمونه‌ها و سنگ‌نگاری

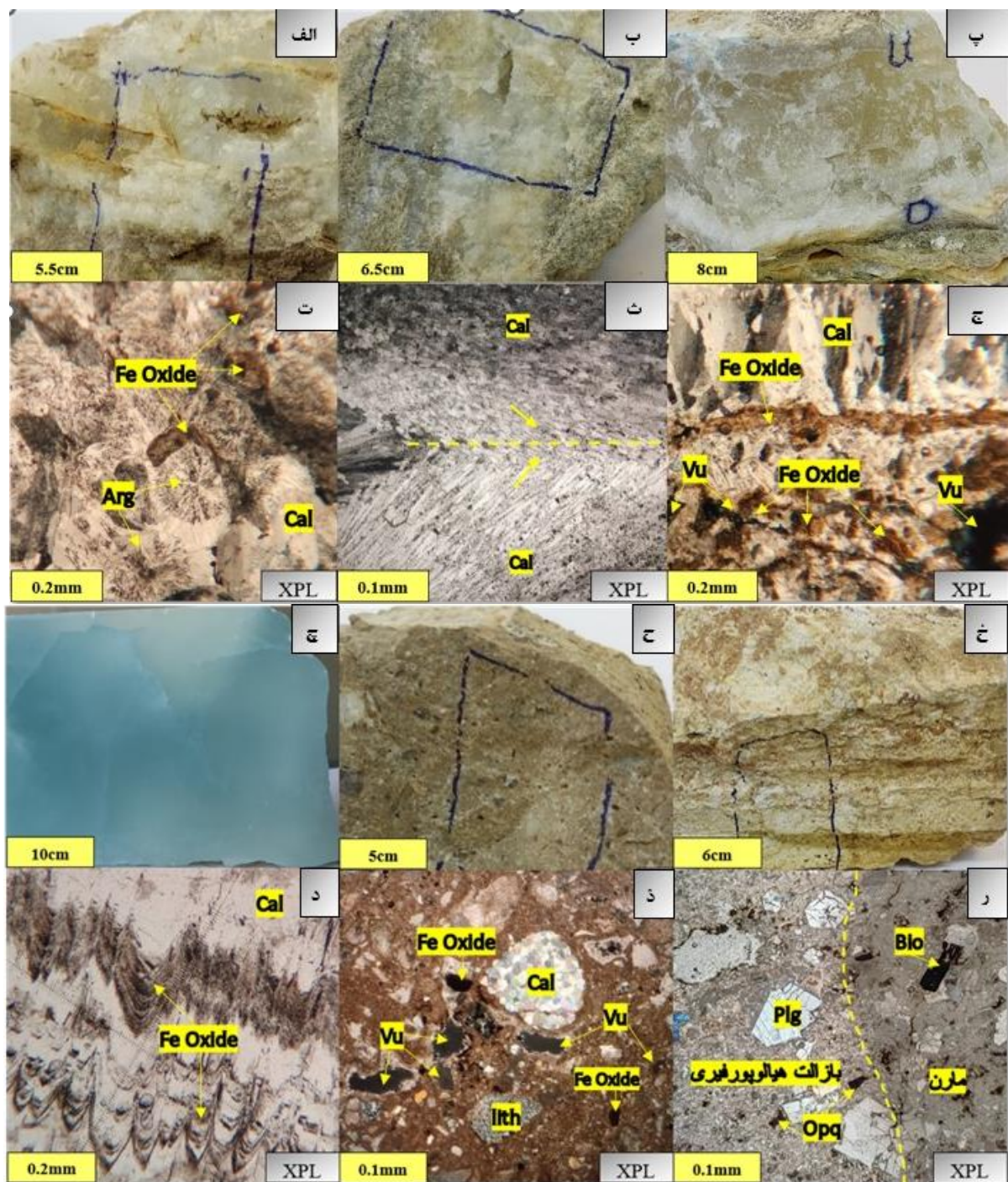
بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری انجام شده، بافت عمده نمونه‌ها الیافی و موزاییکی است، اما بافت‌های فرعی چون دسته جارویی و گویچه‌ای نیز دیده می‌شود. کانی اصلی در اصل کلسیت است و در برخی نمونه‌ها آراگونیت نیز وجود دارد. کانی‌های فرعی آلبیت و کوارتز، به ویژه در نمونه‌های همبر با واحدهای سنگی مارن و گدازه‌های آتشفشانی دیده می‌شود. رگه و رگچه‌های اکسید آهن ناشی از رسوب‌گذاری میان بافتی از دیگر اجزای تشکیل دهنده این سنگ‌ها هستند که منجر به تشکیل بافت نواری رنگی در برخی نمونه‌ها شده است. تصویر نمونه دستی و مقطع میکروسکوپی همراه با شرح سنگ‌نگاری ۶ نمونه منتخب در شکل ۲ آورده شده است.

چشمگیری دارند. حضور سنگ‌های آهکی کرتاسه، ژوراسیک و سایر کربناتیای قدیمی در مسیر چشمه‌های تراورتن‌ساز وابسته به فعالیت‌های آتشفشانی جدید سهند (میوسن-پلیوسن) که در یک نوار پهن با راستای ۱۲۵ درجه قرار دارند، موجب تشکیل این واحدهای سنگی روی سازند لار شده است [۱۵، ۱۹، ۲۰]. ضخامت متوسط این طبقه‌ها با رخنمون نواری و لایه‌ای بین ۵۶-۱۲ متر متغیر است [۲۱]. معدن مرمراونیکس نقده در ۹۵ کیلومتری جنوب شهر ارومیه در استان آذربایجان غربی و پهنه سنندج-سیرجان قرار دارد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی معادن مرمراونیکس و تراورتن به تفکیک استان‌های کشور و نیز موقعیت جغرافیایی نمونه‌های مورد بررسی بر نقشه باز رسم شده فعالیت ماگمایی ایران نشان داده شده است.



توزیع معادن مرمر و تراورتن بر اساس استان‌های کشور

شکل ۱ نقشه باز رسم شده فعالیت ماگمایی ایران و موقعیت جغرافیایی معادن مرمراونیکس و تراورتن به تفکیک استان‌های کشور و نمونه‌های منتخب برای بررسی.



شکل ۲ الف: نمونه دستی مرمراونیکس معدن یخی کمال، ب: نمونه دستی مرمراونیکس با میان لایه مارن معدن یخی کمال، پ: نمونه دستی مرمراونیکس نباتی معدن مجین، ت: بلورهای آراگونیت (Arg) همراه با کلسیت‌های هم اندازه (Cal) پیرامون آراگونیت‌ها و انبوهه‌های پراکنده اکسید آهن (لیمونیت) در طول شکستگی‌ها و فضاهای خالی سنگ. ث: ساخت جناغی برآمده از آرایش کلسیت‌های دسته‌جاری در کنار هم. ج: کلسیت‌های تیغه‌ای موازی هم (Cal)، اکسید آهن (لیمونیت) به صورت رگه‌ای و انبوهه‌های پراکنده، حفره‌های متعدد (Vu). چ: نمونه دستی مرمراونیکس آبی مجین، ح: نمونه دستی مارن معدن یخی کمال، خ: نمونه دستی از همبری مارن و بازالت شیشه‌ای پورفیری معدن مجین، د: تیغه‌های کلسیت (Cal) موازی هم همراه با تهنشست اکسید آهن (لیمونیت) به صورت لامینه‌های موجی شکل در فضای خالی بین تیغه‌های کلسیت. ذ: اکسید آهن (گوئیتیت)، کلسیت با انباشت گلومرول (Cal)، قطعه‌های سنگی (Lith) و حفره‌های متعدد (Vu) در زمینه میکرایت. ر: قطعه‌های خرد شده پلاژیوکلاز (plg)، بیوتیت (Bio)، کانی‌های تیره (Opq).

زمین‌شیمی

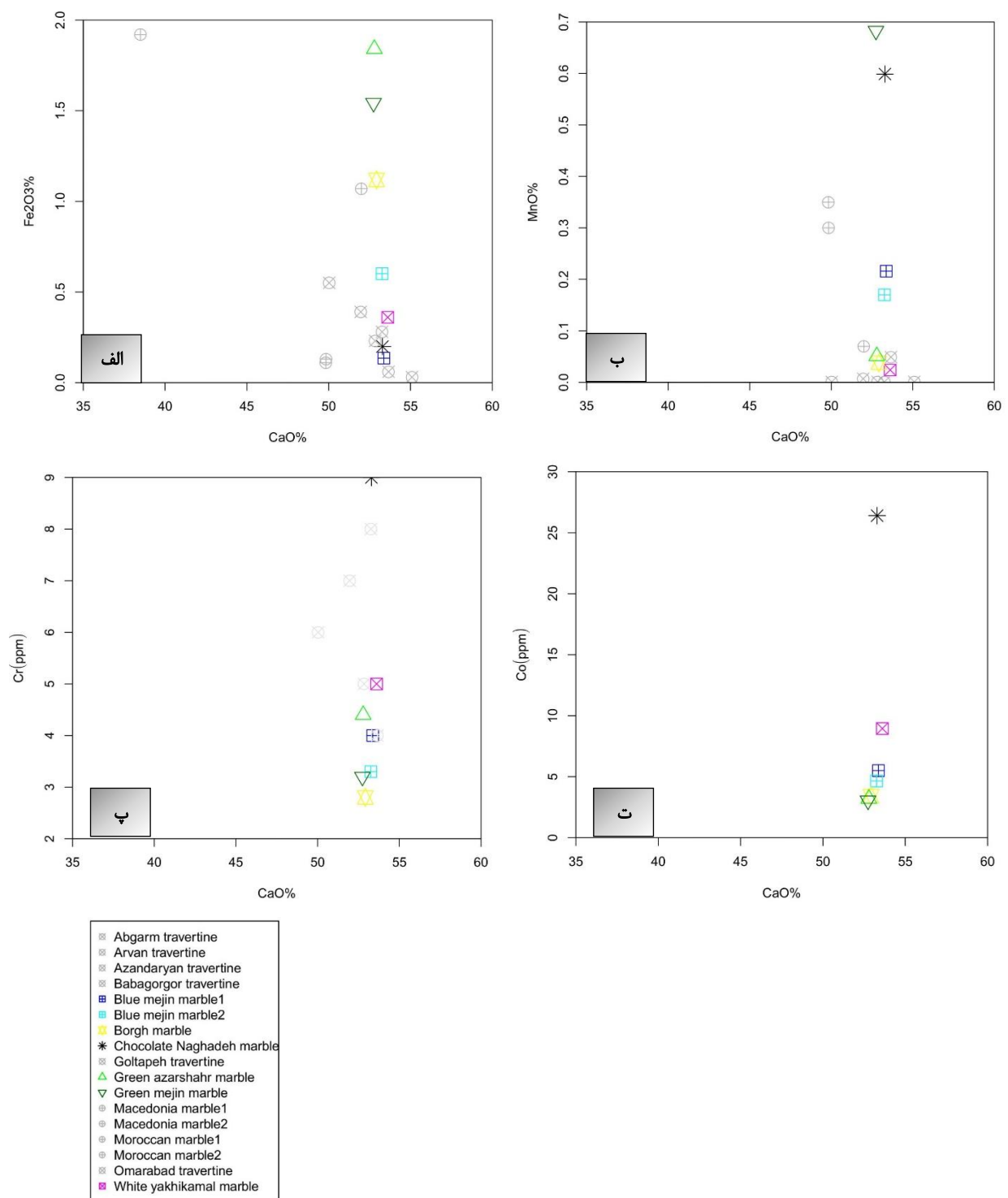
مقدار اکسیدهای اصلی، رطوبت نسبی و عناصر خاکی نادر (REE) موجود در ۷ نمونه منتخب برای بررسی‌های زمین‌شیمی در جدول ۲۱ آورده شده است.

مهمترین عناصر رنگزا شامل Fe, Cr, Mn, Co, Ni, Cu حتی در مقادیر بسیار جزئی (درصد ppm) اثر بسیار مهمی بر رنگ کانی‌ها و سنگ‌ها دارند (شکل ۳). حضور این عناصر که ناقل رنگ نامیده می‌شوند، برای انحلال در چشمه‌های آبگرم و رنگین شدن کربنات پایه لازم است. مقدار عنصر آهن در نمونه‌های مورد بررسی از ۰.۰۷ درصد (مرمرائونیکس سبزکاهویی آذرشهر) تا ۱.۰۱ درصد (مرمرائونیکس آبی مجین)

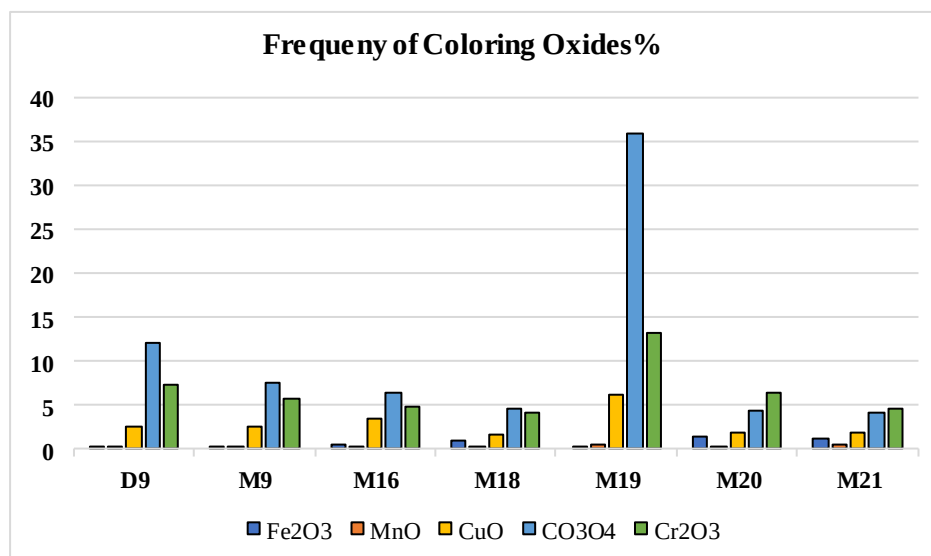
در تغییر است. عنصر مس در نمونه‌های مورد بررسی در گستره ۱.۲-۴ ppm (مرمرائونیکس شکلاتی نقده-مرمرائونیکس سبز بورق) است. بیشترین مقدار عنصر کروم ۹ ppm (مرمرائونیکس شکلاتی نقده) و کمترین مقدار آن ۲.۸ ppm (مرمرائونیکس سبزشفاف بورق) است. بیشترین مقدار منگنز ۴۱۵۴/۸۱ ppm (مرمرائونیکس سبز مجین) و کمترین مقدار آن ۱۳۳/۶ ppm (سفید یخی کمال) است. بیشترین مقدار عنصر کبالت ۲۶/۴ ppm (مرمرائونیکس شکلاتی نقده) و کمترین مقدار آن ۳/۴ ppm (مرمرائونیکس سبز شفاف بورق) بوده و مقدار عنصر نیکل نیز در گستره ۵/۱-۱/۲ (مرمرائونیکس شکلاتی نقده-مرمرائونیکس سبز مجین) است (شکل ۴).

جدول ۲ مقدار اکسیدهای اصلی (برحسب درصد)، رطوبت نسبی و REE نمونه‌های مورد بررسی.

Sample Name	D9	M9	M16	M18	M19	M20	M21
location	یخی کمال	مجین	مجین	بورق	نقده	آذرشهر	مجین
Color	سفید	آبی	آبی	سبز شفاف	شکلاتی	سبز	سبز
Al ₂ O ₃	۰.۰۲۲	۰.۰۲۴	۰.۰۲۳	۰.۰۲۳	۰.۰۲۲	۰.۰۲۳	۰.۰۲۲
Fe ₂ O ₃	۰.۳۶۰	۰.۱۳۵	۰.۶۰۱	۱.۱۱۸	۰.۱۹۹	۱.۸۴۱	۱.۵۴۳
MnO	۰.۰۲۴	۰.۲۱۶	۰.۱۷	۰.۰۳۸	۰.۵۹۹	۰.۰۵۱	۰.۶۸۳
MgO	۰.۴۴	۰.۱۰۸	۰.۲۶۱	۰.۴۸۸	۰.۱۸۷	۰.۴۴۷	۰.۲۵۳
CaO	۵۳.۶۱	۵۳.۳۷	۵۳.۲۶	۵۳.۹۲	۵۳.۲۹	۵۳.۷۹	۵۳.۷۴
Na ₂ O	۰.۲۳۶	۰.۴۵۹	۰.۵۲۳	۰.۵۰۱	۰.۲۲۴	۰.۴۳۴	۰.۳۴۱
K ₂ O	۰.۰۱۴	۰.۰۲۷	۰.۰۱۵	۰.۰۱۵	۰.۰۴۴	۰.۰۱۵	۰.۰۳۰
P ₂ O ₅	۰.۰۲۴	۰.۰۲۷	۰.۰۲۶	۰.۰۲۵	۰	۰.۰۲۵	۰.۰۲۵
CO ₂	۴۳.۸۵	۴۳.۶۴	۴۳.۵۶	۴۳.۲۴	۴۳.۵۸	۴۳.۱۷	۴۳.۱۲
Moisture%	۰.۳۹	۰.۷۳	۰.۵۴	۰.۶۱	۰.۸۳	۰.۱۹	۰.۲۲
Total	۹۹.۹۷	۹۹.۷۰۹	۹۹.۹۷۹	۹۹.۹۷۸	۹۹.۹۷۵	۹۹.۹۸۶	۹۹.۹۷۷
As(ppm)	۲.۱	۲۴.۵	۴.۵	<۱	۶.۹	۲۳.۹	۱
Ba(ppm)	۲۸.۸	۴۹.۶	۱۴.۴	۲۳.۶۵	۳۰.۷	۲۶.۷۵	۱۲.۹۵
Be(ppm)	۳.۶۲	۸.۶۵	۸.۵۳	۲.۵۲	۱.۲۹	۱۰.۵۵	۸.۷۳
Ce(ppm)	<۱	۵	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱
Co (ppm)	۸.۹۵	۵.۵	۴.۶۵	۳.۴	۲۶.۴	۳.۲	۳.۰۵
Cr(ppm)	۵	۴	۳.۳	۲.۸	۹	۴.۴	۳.۲
Cs(ppm)	<۱	۲۹.۸۹	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱
Cu(ppm)	۲.۱	۲.۱	۲.۶	۱.۲	۴.۶	۱.۴	۱.۳
Dy(ppm)	<۱	۱.۵	<۱	<۱	<۱	<۱	۱.۵۳
Er(ppm)	<۱	۱.۱۹	<۱	<۱	<۱	<۱	۲.۶
La(ppm)	<۱	۳.۲	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱
Li(ppm)	۸.۶۶	۱۰.۵۱	۱۴.۶۴	۲۵.۵۷	۴.۳۳	۸.۸۷	۱۰.۱
Mn(ppm)	۱۳۳.۶	۱۲۲۲.۴۳	۹۹۶.۳	۲۲۳۳.۴	۳۷۳۴.۵۹	۳۲۵.۰۲	۴۱۵۴.۸۱
Nd(ppm)	<۱	۲.۵	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱
Nb(ppm)	<۱	۲	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱
Ni(ppm)	۲.۸	۲.۳	۱.۹	۱.۳	۵.۱	۲.۷	۱.۲
Pb(ppm)	۴	۷.۲	۴	۵	۶.۲	۹	۶.۴
Pr(ppm)	<۱	۱.۲	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱
Rb(ppm)	<۱	۷	<۱	<۱	۲	<۱	<۱
Sr(ppm)	۴۲۰	۱۰۰۱	۲۱۷	۱۴۴۹	۱۱۷	۱۲۵۸	۵۸۵
U(ppm)	<۱	۶.۲	<۱	<۱	۱.۹۸	۲۵۶	<۱
V(ppm)	۱	۹	۱	۱	۱	۴	۳۱
W(ppm)	۱۱۹.۵	۱۳۹.۵	۲۶۶.۵	۳۴.۵	۲۶۱	۱۸	۳۸
Y(ppm)	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱	۱.۸	۲.۵
Zn(ppm)	۵۶۹	۷.۷۷	۷.۲۳	۱۱.۱۵	۳۶.۹۲	۱۵.۵۴	۸.۵۴
Zr(ppm)	<۱	<۱	<۱	۲.۵	<۱	۷.۴	۱.۲



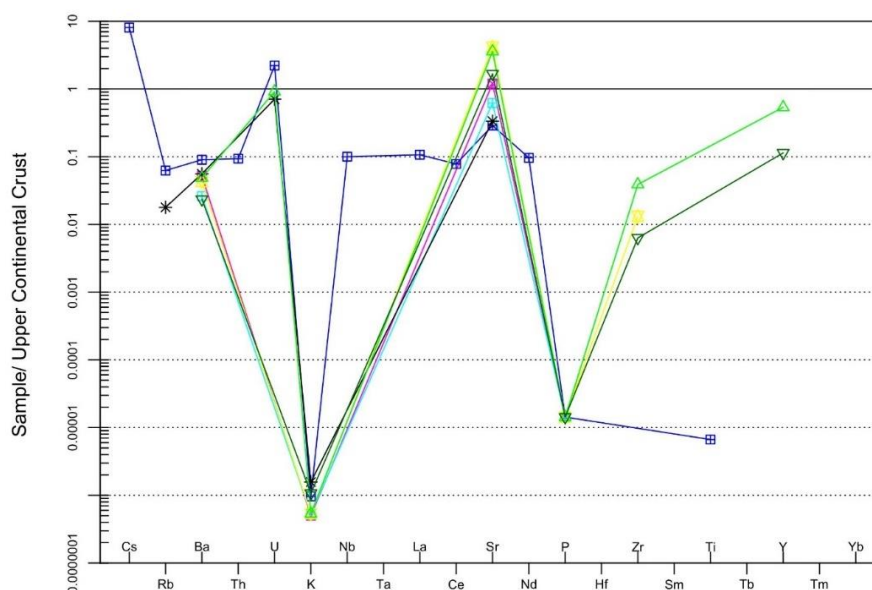
شکل ۳: نمودار تغییر مقادیر ۴ عنصر رنگزای اصلی در نمونه‌های مورد بررسی: الف) مقدار اکسید کلسیم نسبت به اکسید آهن، ب) مقدار اکسید کلسیم نسبت به اکسید منگنز، پ) مقدار اکسید کلسیم نسبت به کروم، ت) مقدار اکسید کلسیم نسبت به کبالت موجود در نمونه‌های مورد بررسی (نمادهای رنگی) و ۱۰ نمونه مرمرآونیکس و تراورتن منتخب (نمادهای بی‌رنگ) از سایر مراجع [۲۲-۲۴] نبود عنصر کبالت در نتایج تجزیه نمونه‌های منتخب از سایر مراجع، موجب حذف این داده‌ها از نمودار عنصر کبالت گردیده است.



شکل ۴ نمودار فراوانی مهمترین اکسیدهای رنگزا در نمونه‌های مورد بررسی.

اشباع‌شدگی نسبی است. نمونه M16 (مرمراونیکس آبی مجین ۱) با وجود هماهنگی نسبی با روند کلی غنی‌شدگی و تهی‌شدگی نمودار، در مورد برخی عناصر، دارای کمترین همخوانی با سایر نمونه‌هاست، به طوری که در مورد عناصری چون Cs, Rb, Th, U, Nb, Ta، دارای غنی‌شدگی بیشتر بوده و در مورد عناصری مانند Sr, Hf, Zr، و Ti تهی‌شدگی بیشتری را نشان داده است.

عناصر کمیاب و خاکی نادر (REE) مرمراونیکس‌های مورد بررسی با متوسط شیمی پوسته بالایی [۲۵] بهنجار شد (شکل ۵). این مقایسه نشان داد که نمونه‌ها از عناصر U و Sr غنی‌شده و دارای تهی‌شدگی از عناصری چون K, Nb, Ta, La, P و Hf بوده و عناصر Rb, Ba, Th, Ce, Nd و Zr نزدیک به اشباع‌شدگی و متوسط شیمی سطح پوسته هستند. گفتنی است که عنصر Y تنها در نمونه‌های M20 و M21 (مرمراونیکس سبز آذرشهر و مرمراونیکس سبز مجین) دارای

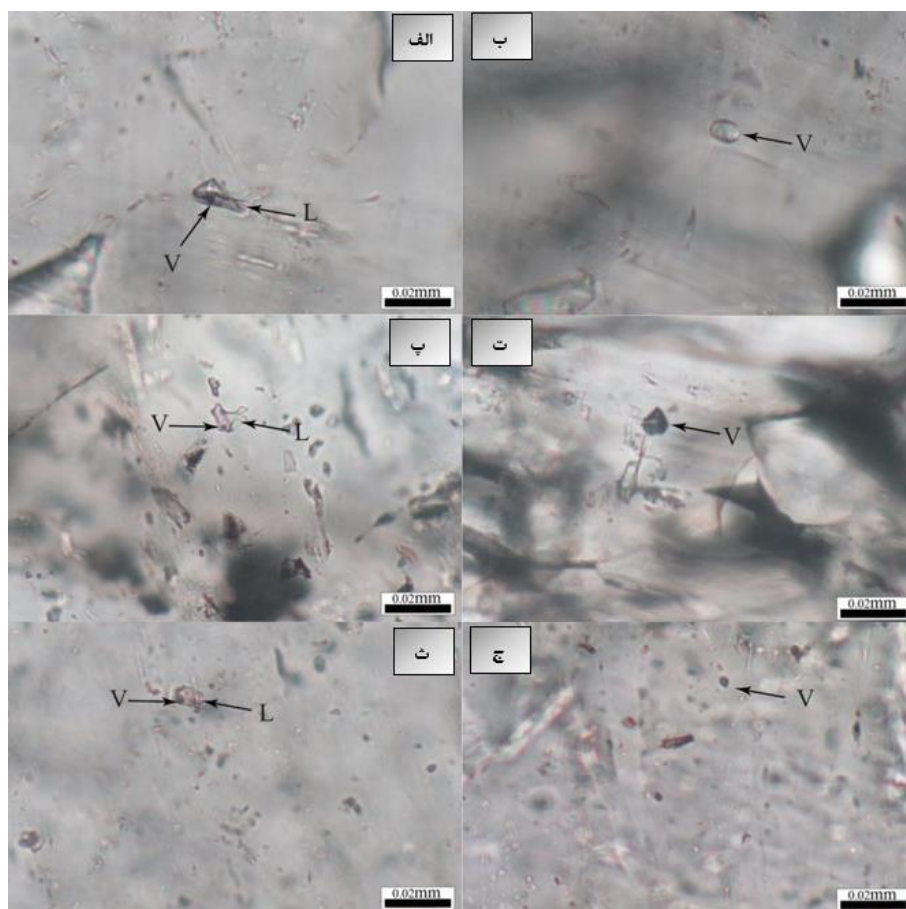


شکل ۵ نمودار عنکبوتی بهنجار شده REE موجود در نمونه‌های مورد بررسی نسبت به شیمی پوسته قاره‌ای بالایی (UCC) [۲۵].

میانبارهای سیال

میانبارهای سیال درون بیشتر کانی‌هایی که در یک محیط سیال (بخار، مایع و گاز) تشکیل شده‌اند وجود دارند، این امر موجب می‌شود تا بتوان از آن‌ها به صورت گسترده در بررسی‌های سنگ‌نگاری بهره گرفت. بر پایه بررسی میانبارهای سیال می‌توان اطلاعات ارزشمندی چون دمای تشکیل کانی‌ها، فشار محیط تشکیل آن‌ها، چگالی سیال تشکیل دهنده کانی‌ها و نیز ترکیب شیمیایی سیال‌های کانی‌ساز بدست آورد [۲۶]. میانبارهای سیال برای ۳ مقطع دوبر صیقل از نمونه‌های D9 (مرمرائونیکس سفید یخی‌کمال)، M9 (مرمرائونیکس آبی مجین ۲) و M19 (مرمرائونیکس شکلاتی نقده) بررسی شدند. انواع میانبارهای سیال در این نمونه‌ها تک فاز گاز (V)، دو فاز غنی از مایع (V+L) و میانبار سیال دو فاز $L+LCO_2+V$ هستند. اندازه میانبارها کمتر از ۲۰ میکرون است و بیشتر با شکل‌های نامنظم دیده می‌شوند (شکل ۶).

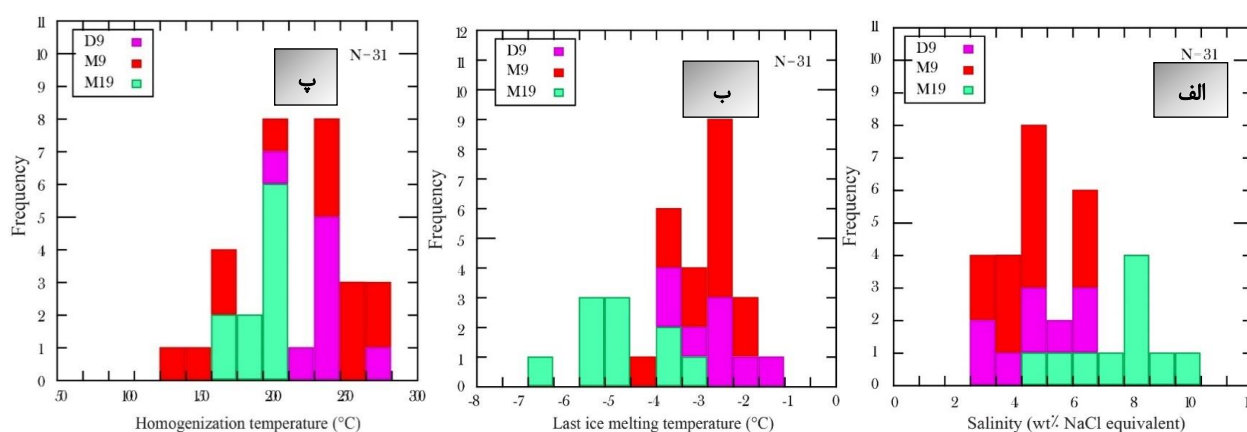
با گرمایش میکروسکوپی نمونه‌های مورد بررسی، گستره دمای همگن شدگی تبدیل بخار به مایع میانبارهای سیال ۱۳۲-۲۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد. بیشترین فراوانی دمای همگنی در گستره دمایی ۲۵۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه شده است. مقدار نمک در میانبارهای سیال نمونه‌های مورد بررسی در گستره ۹/۹۸-۲/۹۰ درصد وزنی NaCl متغیر است (جدول ۳). دمای ۶- درجه سانتی‌گراد برای بیشترین شوری (معادل ۹/۹۸ wt%NaCl) و دمای ۱/۷- درجه سانتی‌گراد برای کمترین شوری (معادل ۲/۹۰ wt%NaCl) در میانبارهای سیال اندازه‌گیری شده است. بیشترین فراوانی شوری در گستره ۶-۳ درصد وزنی NaCl است. گستره تغییر دمای ذوب آخرین قطعه یخ از ۶/۶- تا ۱/۷- درجه سانتی‌گراد است و بیشترین فراوانی در دمای ۴- تا ۲/۵- درجه سانتی‌گراد دیده می‌گردد (شکل ۷).



شکل ۶ الف) میانبارسیال دوفازی غنی از مایع مرمرائونیکس سفید معدن یخی‌کمال. ب) میانبارسیال تک‌فاز گازی مرمرائونیکس سفید یخی‌کمال. پ) میانبارسیال دو فاز غنی از مایع مرمرائونیکس آبی معدن مجین. ت) میانبارسیال تک‌فاز گازی مرمرائونیکس آبی معدن جین. ث) میانبارسیال دو فاز غنی از مایع مرمرائونیکس شکلاتی نقده. ج) میانبارسیال تک‌فاز گازی مرمرائونیکس شکلاتی نقده.

جدول ۳ نتایج آزمایش‌های گرمایش و سرمایش، مقدار شوری، نوع و فاز میانبارهای سیال نمونه‌های مورد بررسی.

Sample name	Fluid inclusion type	phase	Tutec	TICE	TICE+	Salinity	Th V-L
D9	P	L-V		-۲	۲	۳٫۳۹	۲۲۸
D9	P	L-V	-۴۸٫۳	-۲٫۶	۲٫۶	۴٫۴۳	۲۷۰
D9	P	L-V		-۳٫۹	۳٫۹	۶٫۳۰	۲۱۰
D9	P	L-V		-۳٫۲	۳٫۲	۵٫۲۶	۲۳۱
D9	P	L-V		-۴	۴	۶٫۴۵	۲۴۶
D9	P	L-V		-۲٫۶	۲٫۶	۴٫۳۴	۲۳۰
D9	P	L-V	-۴۶٫۲	-۱٫۷	۱٫۷	۲٫۹۰	۲۴۳
D9	P	L-V		-۲٫۳	۲٫۳	۳٫۸۷	۲۳۱
M9	P	L-V		-۳	۳	۴٫۹۶	۱۵۰
M9	P	L-V		-۲٫۶	۲٫۶	۴٫۳۴	۱۳۲
M9	P	L-V		-۴	۴	۶٫۴۵	۲۵۵
M9	P	L-V	-۵۵٫۹	-۲٫۵	۲٫۵	۴٫۱۸	۲۸۰
M9	P	L-V	-۵۰٫۷	-۱٫۳	۳٫۱	۵٫۱۱	۱۹۸
M9	P	L-V		-۴٫۲	۴٫۲	۶٫۷۴	۲۵۶
M9	P	L-V		-۳٫۷	۳٫۷	۶٫۰۱	۲۷۳
M9	P	L-V		-۲٫۶	۲٫۶	۴٫۳۴	۲۳۶
M9	P	L-V		-۲٫۳	۲٫۳	۳٫۸۷	۱۵۹
M9	P	L-V		-۱٫۸	۱٫۸	۳٫۰۶	۲۴۰
M9	P	L-V	-۵۵٫۶	-۲٫۴	۲٫۴	۴٫۰۳	۱۶۵
M9	P	L-V		-۱٫۹	۱٫۹	۳٫۲۳	۲۳۸
M9	P	L-V		-۲٫۶	۲٫۶	۴٫۳۴	۲۴۹
M19	P	L-V		-۳	۳	۴٫۹۶	۱۷۰
M19	P	L-V	-۵۵	-۴٫۶	۴٫۶	۷٫۳۱	۱۸۹
M19	P	L-V		-۵	۵	۷٫۸۶	۲۰۰
M19	P	L-V	-۵۰٫۶	-۵٫۶	۵٫۶	۸٫۶۸	۱۹۶
M19	P	L-V		-۳٫۶	۳٫۶	۶٫۱۶	۱۹۳
M19	P	L-V		-۵٫۴	۵٫۴	۸٫۴۱	۲۰۵
M19	P	L-V		-۶٫۶	۶٫۶	۹٫۹۸	۲۰۶
M19	P	L-V		-۵٫۲	۵٫۲	۸٫۱۴	۱۸۷
M19	P	L-V		-۳٫۵	۳٫۵	۵٫۷۱	۱۶۳
M19	P	L-V	-۵۹	-۴٫۹	۴٫۹	۷٫۷۳	۲۱۰



شکل ۷. نمودارهای ستونی میانبارهای سیال در نمونه‌های مورد بررسی: الف) دمای همگن شدگی یا یکنواختی، ب: مقدار شوری و پ) دمای ذوب آخرین قطعه یخ.

بحث

شرایط تشکیل مرمرونی‌کس‌ها

یک سامانه هیدروشیمی آب ابر اشباع از کربنات کلسیم شکل گرفته‌اند [۸]. برای چگونگی تشکیل این دسته از سنگ‌های رسوبی عوامل متعددی برشمرده‌اند، از جمله تغییر نظام آبدی،

به‌طور کلی، نهشته‌های تراورتنی از سیماهای شگرفی هستند که از تعامل بین فرآیندهای زمین‌شیمی، فیزیکی و میکروبی در

(۱) عناصر رنگزا (چون یون‌های فلزهای واسطه، ۲) عوامل رنگزا (چون تبادل بار کاتیون‌ها، تابش یونیده کننده، شکست نور و ناپیوستگی‌های ساختاری در شبکه کانی‌ها).

برخی از عناصر شیمیایی چون K, Be, Mg, Ca, Si, Al, Na, C, P اثر چندانی در رنگ کانی ندارند. در مقابل، عناصر دیگری چون Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, V, Ti حتی در مقادیر بسیار جزئی (درصد PPM) اثر بسیار مهمی بر رنگ کانی‌ها و سنگ‌ها دارند. عناصری که ناقل رنگ نامیده شدند، همه در ردیف چهارم جدول تناوبی قرار می‌گیرند. این عناصر با عنصر تیتان (با عدد اتمی ۲۲) شروع شده و با عنصر مس (با عدد اتمی ۲۹) پایان می‌یابند. از عنصر تیتان به طرف عنصر مس با افزایش عدد اتمی، تعداد پروتون‌ها در هسته عناصر بیشتر می‌شود و در نتیجه جاذبه هسته بر لایه‌های الکترونی بیشتر و شعاع اتمی کاهش می‌یابد. این امر به همراه عوامل دیگری چون الکترون‌کشسانی و ویژگی مغناطیسی منجر به ویژگی‌های بی‌مانند در این عناصر شده است [۳۲]. Ti^{3+} و Ti^{4+} به خودی خود سبب ایجاد رنگ نیستند، اما در اثر تبادل بار یونی با سایر یون‌های فلزی می‌توانند منجر به تغییر رنگ کانی‌ها شوند [۳۳، ۳۴]. حضور یون‌های فلزهای واسطه چه به صورت ناخالصی در بلور و چه به صورت سازنده اصلی، تبادل بار و مراکز رنگی رایج‌ترین عوامل ایجاد رنگ در سنگ‌ها هستند. نه تنها خود عنصر فلز واسطه بلکه ظرفیت یون، عدد همارایی (تعداد پیوندها)، طول و نوع پیوند، اتم‌های کنار یون و چگونگی قرار گیری عناصر واسطه در شبکه بلوری نیز در رنگ به دست آمده موثر هستند. ظرفیت یون‌ها می‌تواند اثر زیادی روی نوع رنگ و شدت آن داشته باشد. برای مثال، حضور مقدار کمی از عنصر منگنز در بریل می‌تواند سبب ایجاد رنگ‌های صورتی ملایم و قرمز شود. چگونگی قرار گرفتن عناصر واسطه در شبکه بلوری نیز در ایجاد رنگ موثر است. هر کانی ساختار بلورین متفاوتی دارد، یک عنصر واسطه ثابت می‌تواند رنگ‌های مختلف در کانی و سنگ‌های متفاوت ایجاد کند. برای مثال، رنگ آلماندن ناشی از حضور عنصر واسطه آهن است. در ساختار بلورین آلماندین، هر اتم آهن با ۸ اتم اکسیژن در بر گرفته شده است [۳۵]. حضور میانبارها و پدیده‌های نوری از نظر اهمیت در جایگاه بعدی قرار دارند [۳۶].

افت فشار، دما، تغییر PH و EH محیط تشکیل یا آب چشمه‌ها و سایر تغییرهای فیزیکوشیمیایی [۱۱]. مرمهرهای اونیکیس نیز مانند تراورتن‌ها از آب‌های گرمایی که غلظت اولیه بالایی از Ca^{2+} و فشار بخشی CO_2 زیادی دارند تشکیل می‌شوند [۶، ۲۷، ۲۸]. در این نوع آب‌ها، گاز زدایی پویای CO_2 فوری پس از خروج روی زمین، باعث افزایش PH و حالت اشباع آب نسبت به $CaCO_3$ شده و سبب ته‌نشست این گروه ویژه از سنگ‌های رسوبی می‌شود [۲۹]. ۷ عامل مهم برای رشد تراورتن و مرمهرهای اونیکیس فهرست شده‌اند: (۱) سرعت فرآیندهای رشد، (۲) دبی آب، (۳) کربناتیای ابر اشباع، (۴) نرخ فرار دی‌اکسیدکربن، (۵) حضور بازدارنده‌های رشد، (۶) سازوکار انتقال یون و (۷) دما. لایه‌های تراورتن اغلب بافت متخلخل دارند و اندازه و شکل تخلخل در آن‌ها متنوع بوده و از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر و گاهی تا بیش از ۱۰ سانتی‌متر در تغییر است، اما مرمراونیکیس‌ها متراکم‌تر، متبلور و اغلب بدون تخلخل چشم‌گیر هستند. برخی از حفره‌ها با رسوب‌های ثانوی کربنات کلسیم چون آراگونیت و کلسیت پر می‌شوند. رخدادهای پس از رسوب‌گذاری چون انحلال و شکستگی‌ها می‌توانند تخلخل و نفوذپذیری را تا دو برابر و حتی بیشتر افزایش دهند [۹]. مرمراونیکیس از نظر ویژگی‌های ریخت‌شناسی ظاهری می‌تواند شامل انواع: نواری (مستقیم، موج‌دار)، هم مرکز، و نواری-لکه‌ای باشد و بافت در اونیکیس شامل انواع مخفی بلور، الیافی، الیافی مورب، دانه درشت، ستونی، بادبزی و برشی است. مرمراونیکیس‌ها را افزون بر شرایط تشکیل و ترکیب کانی-شناسی از نظر رنگ غالب و شفافیت نیز در انواع شفاف، نیمه شفاف و مات تقسیم بندی می‌کنند [۳۰، ۳۱].

عوامل رنگزا در مرمراونیکیس‌ها

کانی‌ها دارای ویژگی‌های متعددی هستند و رنگ اغلب نخستین و بارزترین آن‌هاست. در برخی از کانی‌ها، رنگ می‌تواند یک مشخصه و معیار تشخیص باشد. رنگ عامل مهمی برای تعیین ارزش سنگ و کشش آن در بازار است. رنگ سنگ‌ها با کمی تغییر در ترکیب شیمیایی و یا شرایط تشکیل تغییر می‌کند و با توجه به تقاضای بازار و سلیقه مردم ارزش اقتصادی سنگ نوسان فاحشی می‌یابد. به طور کلی زایش رنگ در کانی‌ها را می‌توان به دو دسته از عوامل نسبت داد:

فرآیندهای الکترونی ایجاد کننده رنگ در کانی‌ها به سه گروه شکل میدان بلوری، تبادل اوربیتال‌های مولکولی (انتقال بار) و مراکز رنگی تقسیم می‌شوند [۳۵]. اغلب رنگ ناشی از شکل‌های مختلف میدان بلوری برآمده از یون‌ها با الکترون‌های جفت نشده است. این عناصر اغلب لایه d نیمه‌پر دارند چون Cr، Mn، Fe، Co و Ni، یا از عناصر با لایه f نیمه پر مانند اکتنیدها و لانتانیدها شکل می‌گیرند. هنگامی که همه پوسته‌های الکترون کاملاً پر یا خالی هستند، مانند Cr^{6+} ، Ce^{+} یا Cu^{+} ، که هیچ الکترون جفت نشده‌ای وجود ندارد این نوع رنگ نمی‌تواند ایجاد شود. این در حالی است که در کانی دارای مقداری کروم سه ظرفیتی (Cr^{3+})، پیکربندی الکترونی به شکل $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^3$ است. در اینجا فقط سه الکترون جفت نشده در لایه بعدی می‌توانند با نور مرئی تعامل کنند تا جذب و رنگ ایجاد کنند [۳۵]. تبادل بار یونی بین کاتیون‌ها (چون تبادل بار بین Fe^{2+} و Fe^{3+} ، Ti^{3+} و Ti^{4+} ، Fe^{2+} و Ti^{2+} و Mn^{2+} و Ti^{4+}) عامل ایجاد رنگ در بسیاری از کانی‌هاست. حضور میانبارهای ریز و تبادل یونی بین آهن و تیتانیوم سبب ایجاد یک نوار جذبی نور به ضخامت ۵۰۰ نانومتر در کانی کوارتز شده که رنگ آن را به رنگ صورتی یا گلی تغییر می‌دهد [۳۷]. حضور آلومینیوم به تنهایی ایجاد رنگ نمی‌کند و به تابش نیاز دارد. تابش طبیعی در طول زمان‌های زمین‌شناسی می‌تواند الکترون را از اکسیژن جدا کند و رنگ دودی کوارتز را سبب شود. اگر مقدار آلومینیوم کافی باشد، رنگ کوارتز می‌تواند کاملاً سیاه شود. با گرمادهی، رنگ دودی کوارتز از بین رفته و دوباره بی‌رنگ می‌شود [۳۶].

کلسیت که کانی غالب مرمرهای اونیکس است در رنگ‌های متنوعی دیده می‌شود. در میان بسیاری از ناخالصی‌های رایج مرمر اونیکس‌های رنگی به مواد آلی (پدیدآورنده رنگ خاکستری تا سیاه)، کلریت (سبز روشن تا سبزمايل به زرد) و مقادیر جزئی کانی‌های رسی می‌توان اشاره کرد. سیلیکات‌های آواری از پیش رنگ‌آمیزی شده با آهن نیز می‌توانند انواع طیف‌های رنگی از سبز، قهوه‌ای، قرمز و... با شدت رنگ‌های مختلف را پدید آورند [۱۲]. از مهمترین عوامل رنگزا در ایجاد طیف‌های متنوع رنگی در مرمر اونیکس و تراورتن‌ها اکسید آهن و به مقدار کمتر اکسید منگنز است. روشن‌تر یا تیره‌تر بودن رنگ قرمز در رسوب‌ها نمایانگر تفاوت در مقدار اکسید آهن

است، اما سایر رنگ‌ها چون زرد، کرم، نارنجی و یا قهوه‌ای روشن ناشی از اثر مقدار آبی بوده که پس از تشکیل به مرمر و تراورتن در تماس با سنگ هستند و موجب تغییر رنگ (رنگ-پریدگی) آن می‌شوند. علت نواری بودن این تغییر رنگ‌ها در واقع به درصد اکسید آهن همراه با بی‌کربنات محلول هنگام تشکیل رسوب بستگی دارد و کم و بیش می‌تواند در سراسر یک لایه یکسان باشد. گاهی محلول رنگی به صورت ثانوی در شکستگی‌ها و درزه‌های سنگ نفوذ کرده و به‌طور محلی و بی-نظم موجب رنگ‌آمیزی سنگ میزبان می‌شود. چنان که بیان شد، ناخالصی‌های مختلف در سنگ مرمر اونیکس باعث ایجاد رنگ‌های مختلف در سنگ می‌شود. مرمر اونیکس یکدست سفید کمترین مقدار ناخالصی را دارد و بندرت در طبیعت دیده می‌شود.

شفافیت

شدت و مقدار عبور نور از بلورها و گوهرها با اصلاح شفافیت بیان می‌شود. در سنگ‌ها و گوهرهای شفاف نور به طور کامل عبور می‌کند و اشیاء از پشت آن‌ها دیده می‌شوند. کانی و سنگ نیمه شفاف تا حدی نور را از خود عبور داده ولی اشیاء از پشت آن‌ها دیده نمی‌شوند [۳۲]. شفافیت از ویژگی‌های مهم در ارزش گذاری سنگ‌های قیمتی و نیمه قیمتی است؛ چنانچه شفافیت با خلوص و خوشرنگ بودن سنگ همراه باشد، ارزش سنگ بسیار بالاست. وجود ناخالصی‌ها از میزان شفافیت سنگ می‌کاهد. اغلب درجه شفافیت در کانی‌ها و بلورهایی که به صورت منفرد رشد می‌کنند بالاست، ولی کانی‌هایی که به صورت رشته‌ای، دانه‌ای و توده‌ای انباشت می‌شوند، به دلیل شکست و بازتاب نور در مرز رشته‌ها و دانه‌ها شفافیت پایینی دارند. حباب‌های به دام افتاده هوا و آب نیز از شفافیت سنگ می‌کاهند. جذب همه یا بخش عمده پرتوهای نوری به ویژه در سنگ‌های بی‌شکل و یا دانه ریز رخ می‌دهد. دلیل دیگر تیرگی کانی‌ها افزون بر جذب پرتوهای نور، شکست کامل پرتو نور در مرز بین بلور و سنگ میزبان است که به انحراف مسیر پرتوهای خروج نور و خروج آن از بلور می‌انجامد [۳۲]. با وجود نقش تعیین کننده آب در میزان شفافیت سنگ، با توجه به مقدار کم رطوبت نسبی (به طور میانگین ۰/۳۹ درصد) در نمونه‌های مورد بررسی، یکنواختی آرایش بلوری و اندازه بلورهای سازنده

و درصد خلوص، مهمترین عوامل کنترل کننده شفافیت و شادابی رنگ نمونه‌ها هستند.

مقایسه زمین شیمی نمونه‌ها بر پایه شفافیت، نوع و کیفیت رنگ

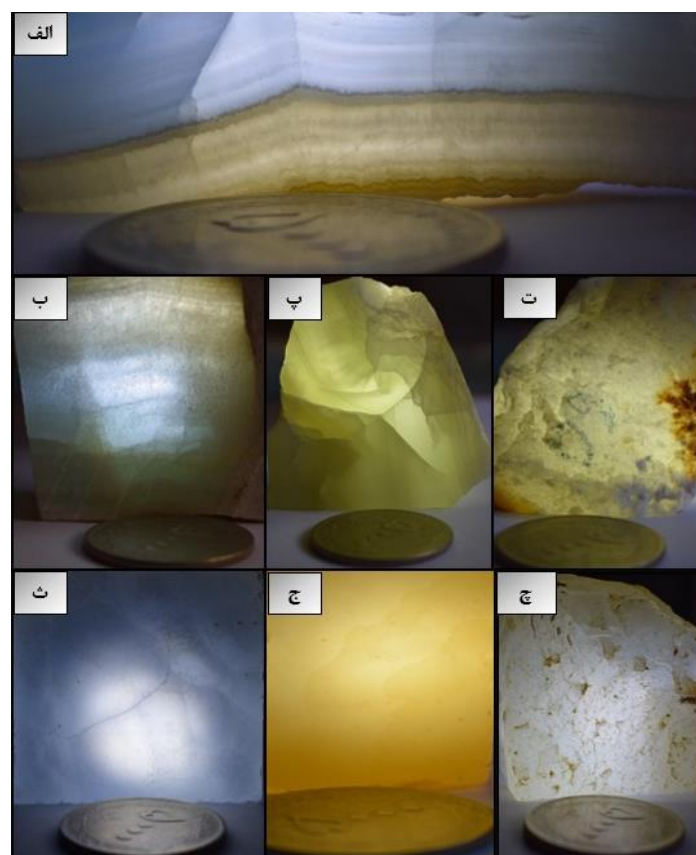
مرمراونیکس آبی مجین ۱ (M16)

جز پایین‌تر بودن درصد Fe_2O_3 در نمونه M16 نسبت به M9، تفاوت چندانی در زمین شیمی این دو مرمراونیکس آبی وجود ندارد. البته، درشت بلورتر بودن و منظم‌تر بودن ساختار بافتی نمونه M16 موجب شادابی رنگ بیشتر و عبوردهی نور بهتر و سرانجام زیبایی ظاهری بیشتر این سنگ شده است (شکل ۸، الف).

مرمراونیکس آبی مجین ۲ (M9)

نمونه M9 دارای متفاوت‌ترین بافت و رنگ در میان سایر نمونه‌هاست و بخش عمده آن را کانی‌های سوزنی آراگونیت در

کنار بلورهای تیغه‌ای کلسیت تشکیل می‌دهند. لایه‌بندی‌های افقی متعدد اکسید آهن و تناوب ردیف‌های بلورین آراگونیت و کلسیت منجر به رج‌های متنوع بافتی و هماهنگی رنگی متفاوت در بخش‌های مختلف آن شده است، از این رو، یکنواخت نبودن توزیع رنگ و شفافیت در این نمونه دیده می‌شود، به طوری که بخش‌های با تمرکز رنگ آبی عبوردهی نور (شفافیت) بیشتری نسبت به سایر بخش‌ها (سفید-کرمی) دارند (شکل ۸ ب). این نمونه پس از M19 دارای بیشترین رطوبت نسبت به سایر نمونه‌هاست. با توجه به مقدار کمینه اکسید آهن در این نمونه و تشابه مقدار سایر اکسیدهای اصلی رنگزای این سنگ با سایر نمونه‌ها فرض اثر فراوانی عنصرهای کروم و مس در این نمونه همراه با تنوع رج‌های مختلف تبلور و نقص بلورین شامل ماکل و شکستگی‌های متعدد به عنوان عامل اصلی رنگزایی در این نمونه تقویت می‌شود.



شکل ۸ تصاویر میزان عبوردهی نور در نمونه‌های مورد بررسی: الف) مرمراونیکس آبی مجین ۱ (نیمه شفاف تا شفاف در بخش‌های آبی رنگ سنگ)، ب) مرمراونیکس آبی مجین ۲ (نیمه شفاف تا شفاف در بخش‌های آبی رنگ سنگ)، پ) مرمراونیکس کاهویی مجین (نیمه شفاف)، ت) مرمراونیکس سفید یخی کمال (نیمه شفاف)، ث) مرمراونیکس شکلاتی نقده (نیمه شفاف)، ج) مرمراونیکس بورق (شفاف)، چ) مرمراونیکس کاهویی آذرشهر (شفاف).

مرمرآونیکس سبز کاهویی مجین (M21)

این سنگ از بلورهای بسیار درشت هم‌اندازه کلسیت تشکیل شده و درشت بلورترین نمونه مورد بررسی است. چنان که پیشتر برای نمونه‌های M18 و M20 بیان شد، این نمونه نیز پس از M20 دارای بیشترین مقدار Fe_2O_3 و کمترین مقدار رطوبت نسبی است. میزان عبوردهی نور در بخش‌های مختلف این نمونه متفاوت است، اما در مجموع از نظر شفافیت و عبوردهی نور نیمه شفاف محسوب می‌شود و با توجه به نبود یکنواختی کامل در عبوردهی نور پس از نمونه مرمرآونیکس بورق و سبز کاهویی آذرشهر قرار دارد (شکل ۸ پ). شکستگی‌های متعدد سطح سنگ نسبت به سایر نمونه‌ها آشکارا بیشتر بوده و این سطح شکست‌های متعدد موجب تفاوت طیف رنگ سبز در بخش‌های مختلف آن شده است.

مرمرآونیکس سفید یخی کمال (D9)

این نمونه سنگی دارای بیشترین خلوص در بین همه نمونه‌های مورد بررسی بوده و نیمه شفاف است و تا حدی نور را از خود عبور می‌دهد (شکل ۸ ت). در کنار نمونه‌های M16 و M19، این نمونه دارای کمترین مقدار اکسید آهن است. یکنواخت نبودن رنگ سفید در این نمونه که از سفید شیری تا نباتی و عسلی متغیر است و رگه‌های زرد و نارنجی در کنار مقدار بالاتر عنصر کبالت نسبت به سایر نمونه‌های مورد بررسی (جز نمونه M19)، فرضیه رنگزایی کبالت با همراهی آهن در بخش‌های نام برده را تقویت می‌کند.

مرمرآونیکس بورق (M18)

نمونه M18 از نظر رنگ، روشن‌ترین (سبز بسیار روشن) و شفاف‌ترین نمونه با بیشترین قابلیت عبوردهی نور است. درصد خلوص این نمونه شبیه دو نمونه مرمرآونیکس سبز دیگر (M20 و M21) است. این نمونه از نظر مقدار آب پس از

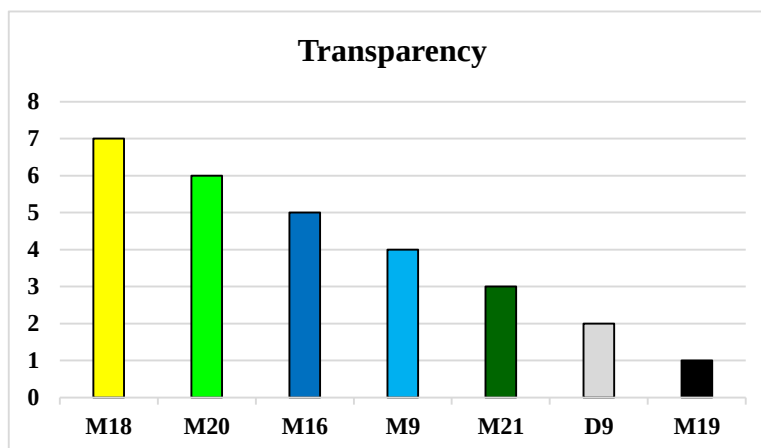
نمونه‌های M9 و M19 دارای بیشترین رطوبت است. نمونه M18 دارای یکی از یکدست‌ترین آرایش‌های بافتی در میان نمونه‌های مورد بررسی است که درشت بلورهای تیغه‌ای تا هم-اندازه کلسیت کاملاً یکدست و منظم در کنار هم قرار دارند افزون بر آن، نبود لایه بندی افقی و میانبار سبب یکنواختی توزیع رنگ و شفافیت این سنگ شده است. (شکل ۸ ث). اینکه نمونه‌های M18، M20 و M21 هر سه دارای طیف‌های مختلفی از رنگ سبز بوده و بیشترین مقدار Fe_2O_3 در بین نمونه‌های مورد بررسی هستند، بیانگر نقش موثر اکسید آهن در ایجاد رنگ سبز در مرمرآونیکس‌هاست.

مرمرآونیکس شکلاتی نقده (M19)

این نمونه از تیغه‌های درشت بلور کلسیت موازی هم تشکیل شده و از درشت بلورترین نمونه‌هاست. یکنواختی بافت آن در ظاهر نمونه نیز آشکار است، به‌طوری‌که با وجود رنگ تیره‌ای که دارد، نیمه شفاف محسوب شده و عبور دهی نور نسبی و یکنواختی در سراسر سنگ دیده می‌شود (شکل ۸ ج). رطوبت نسبی M19 بیشتر از همه نمونه‌های مورد بررسی است. فراوانی بارز REE در این سنگ نسبت به سایر نمونه‌ها توجیه مناسبی برای رنگ شکلاتی آن است [۳۲].

مرمرآونیکس سبز کاهویی آذرشهر (M20)

این سنگ از نظر شفافیت پس از نمونه M20 دارای بیشترین عبوردهی نور (شکل ۸ چ) و همچنین کمترین مقدار رطوبت نسبی در بین نمونه‌های مورد بررسی است. مرمرآونیکس کاهویی آذرشهر همراه با مرمرآونیکس کاهویی مجین کمترین خلوص را در بین نمونه‌ها دارند (شکل ۹). نمونه M20 در بین هم نمونه‌های مورد بررسی دارای بالاترین درصد Fe_2O_3 (مهمترین عامل ایجاد طیف رنگ سبز) است.



شکل ۹. نمودار مقایسه میزان شفافیت در نمونه‌های مورد بررسی.

ویژگی‌های سیال‌کانه‌ساز و محیط تشکیل کانسار مرمراونیکس‌های

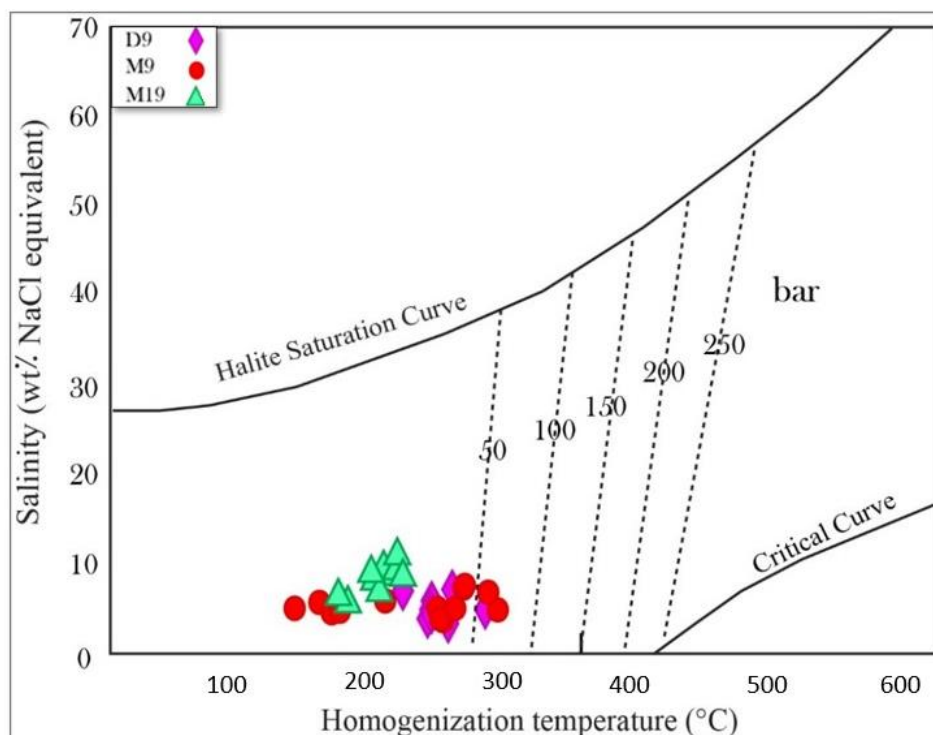
مورد بررسی

بر پایه دمای همگن‌شدگی و شوری میانبارهای سیال می‌توان فشار سیال‌ها را محاسبه نمود. بر اساس نمودار برآورد فشار (شکل ۱۰)، میانبارهای سیال در نمونه‌های مورد بررسی با شوری میانگین ۵ درصد وزنی و دمای همگن‌شدگی ۲۸۰-۱۳۲ درجه سانتی‌گراد، به طور میانگین فشاری کمتر از ۵۰ بار را تجربه کرده‌اند. این روند تغییر فشار به صورت خطی بوده و با افزایش یا کاهش دمای همگن‌شدگی بدون تغییر در شوری هم راستا است.

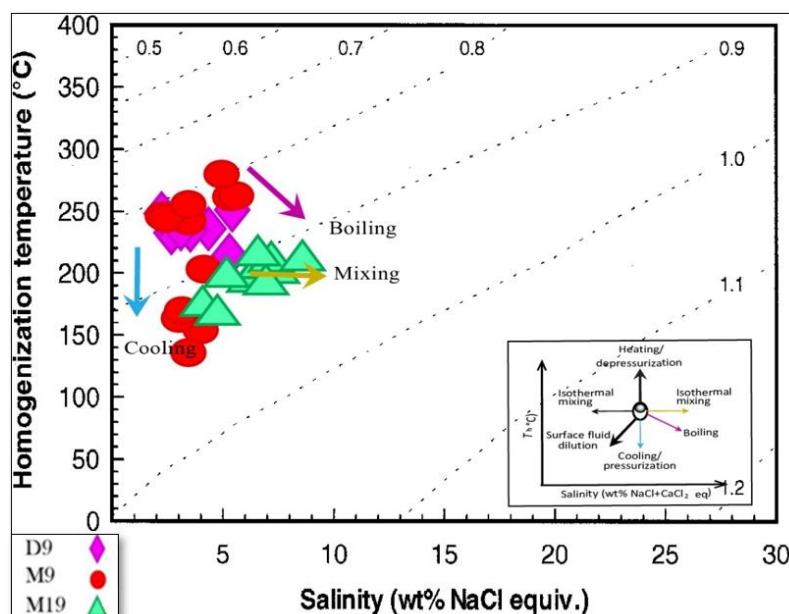
چگالی میانبارهای سیال در نمونه‌های مورد بررسی از ۰/۷۹ تا ۰/۹۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب متغیر هستند اما بیشترین تمرکز در گستره ۰/۸ تا ۰/۹۵ قرار دارد. علت چگالی پایین، می‌تواند حضور میانبارهای سیال دوفازی غنی از گاز در کنار میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع و احتمال وجود

CO₂ زیاد در فاز گازی این سیال‌ها باشد. افزون بر این، کاهش چگالی سیال‌ها با افزایش دما و نیز شوری کم‌وبیش یکسان نمونه‌ها در نمودار دوتایی شوری-دمای همگن‌شدگی آشکار است، که یکی بودن خاستگاه طی صعود را نشان می‌دهد. از رسم داده‌ها به صورت نمودار دوتایی شوری-دمای همگن‌شدگی مشخص شد که افت همزمان دما و شوری، جوشش همزمان با کاهش دما به صورت جزئی و سرد شدن همراه با آمیختگی سیال‌ها مهمترین رخدادهای کانه‌زایی در نمونه‌های مورد بررسی هستند (شکل ۱۱).

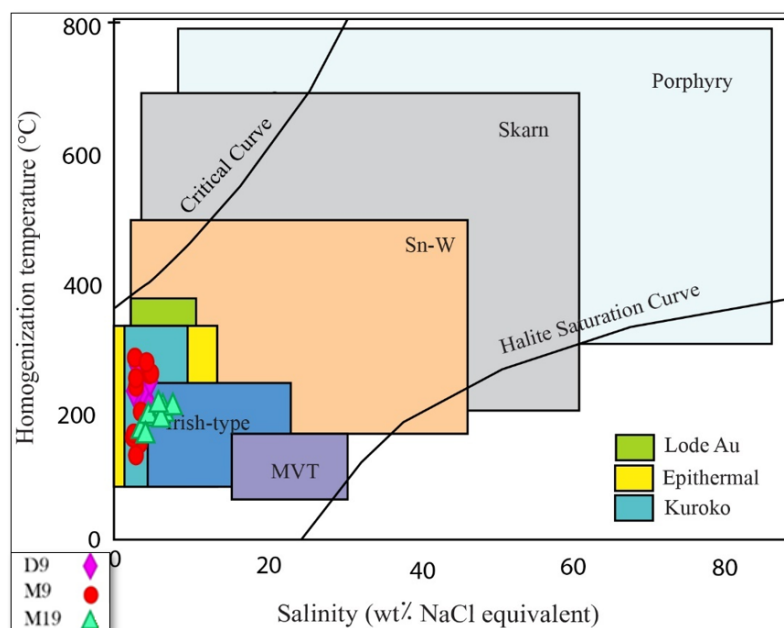
بر اساس جانمایی داده‌ها در نمودار تفکیک سامانه‌های کانه‌زایی [۴۰] در شکل ۱۲، نمونه‌های مورد بررسی در گستره نوع فراگرمایی قرار دارند. که با شرایط دمایی تشکیل کانسار (دمای کم ۲۰۰-۵۰ درجه سانتی‌گراد)، عمق ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ متری و رخنمون رگه‌ای شکل آن همخوانی دارد.



شکل ۱۰ نمودار دمای همگن‌شدگی نسبت به شوری. منحنی اشباع نمک و منحنی بحرانی [۳۸] و خطوط پربندی نشانگر فشار بخار محلول NaCl در دما و شوری معین (خط چین) [۳۹] نشان دهنده دمای همگن‌شدگی و فشار متغیر هستند.



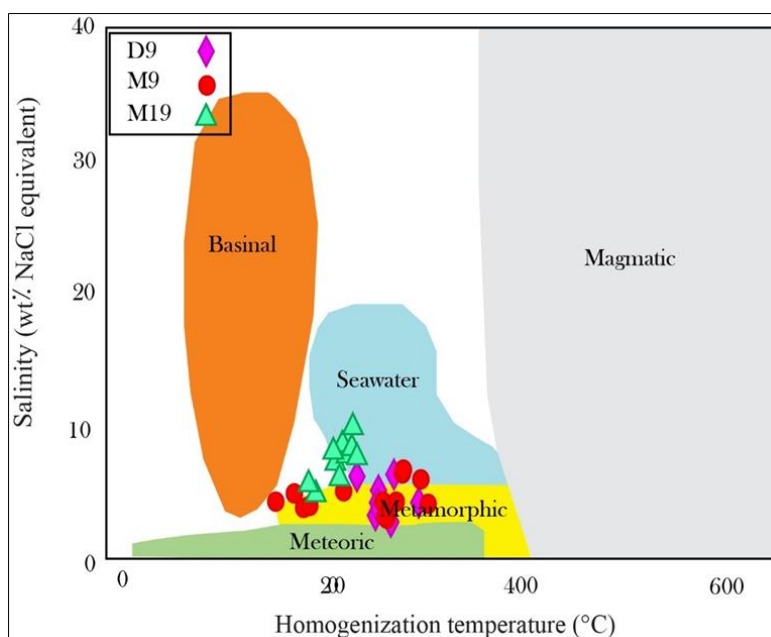
شکل ۱۱ نمودار دوتایی شوری-دمای همگن شدگی برای برآورد چگالی و ارزیابی الگوی نقاط در نمونه‌های مورد بررسی [۴۰].



شکل ۱۲ نمودار شوری - دمای همگن شدگی برای تعیین مکان رسوب گذاری میانبارهای سیال در نمونه‌های مورد بررسی.

واحدهای میانی گسترش یافته‌اند، شرایط دگرگونی مجاورتی در مقیاس محدود را پدید آورده و در پایان، عملکرد همزمان افزایش شیب دمایی بر اثر فعالیت‌های ماگمایی و زمین ساخت پویا در منطقه شرایط تشکیل و صعود این سیال‌های کانه‌ساز را فراهم نموده است. خاستگاه آب دریا برای هر سه نمونه به‌ویژه M19 (مرمرشکلای نقده) با محیط تشکیل سنگ بسترکانسار (سنگ آهک‌های کرتاسه) مورد بررسی همخوانی دارد.

جانمایی نتایج به‌دست آمده از بررسی میانبارهای سیال نمونه‌ها در نمودار دمای همگن شدگی-شوری به منظور تعیین خاستگاه سیال (شکل ۱۳) نشان دهنده خاستگاه جوی و دگرگونی برای نمونه‌های D9 (مرمرانیکس سفید یخی‌کمال) و M9 (مرمرانیکس آبی مجین ۲) است. این امر با توجه به واحدهای سنگی زیرین کانسار، شامل تناوبی از سنگ‌های آهکی-سیلیکاتی، آهک‌میکریتی، آهک‌تخریبی، ماسه و کنگلومرا با آتشفشانی‌های بیشتر آندزیت-بازالتی [۱۶] که به شکل



شکل ۱۳ نمودار دوتایی دمای همگن شدگی-شوری به منظور تعیین خاستگاه سیال نمونه‌های مورد بررسی.

برداشت

همبری سنگ‌های آتشفشانی جوان و گسل‌های متعدد با نهشته‌های تراورتن و مرم‌های اونیکیس در مناطق مورد بررسی نشان‌دهنده عملکرد مؤثر و همزمان فعالیت ماگمایی و زمین ساخت ائوسن در تشکیل این ذخایر ارزشمند است. حضور واحدهای آهکی‌رس‌دار (مارن) در کنار آن‌ها با سامانه‌های گسلی امکان نفوذ و چرخش سیال‌های گرمایی دربردارنده CO_2 را درون آن‌ها ایجاد کرده و با کربن‌زدایی کربنات‌ها، یون بی‌کربنات لازم برای تشکیل مرم‌های اونیکیس و تراورتن‌های منطقه را فراهم آورده است. آراگونیتی بودن مرم‌های اونیکیس گویای شکل‌گیری در دمای بالاتر از ۴۴ درجه سانتی‌گراد و تبلور در فصول گرم سال است. این دسته از مرم‌ها دارای ساختار کم با تراکم کمتر و ناپایداری نسبت به مرم‌های اونیکیس‌های کلسیتی هستند. بالاتر بودن میانگین دمای همگن شدگی نمونه M9 (مرم‌های اونیکیس آبی مجین ۲) و شکنندگی این سنگ، که بخش عمده آن را آراگونیت تشکیل داده است بیانگر این امر است. با وجود خاستگاه مشترک و ترکیب کانی‌شناسی مشابه مرم‌های اونیکیس و تراورتن، به دلیل تفاوت در شرایط تشکیل، مرم‌های اونیکیس نسبت به تراورتن دارای ساخت و بافت و در نتیجه ویژگی‌های فیزیکی و ظاهری متفاوتی است. پایین بودن نرخ

هدررفت گرما، سرعت هسته‌زایی کند و در نتیجه ایجاد هسته‌های اولیه کمتر و تشکیل بلورهای خودشکل تر و درشت‌تر و به‌طور کلی بهره‌مندی از زمان کافی برای تبلور از یک محلول ابر اشباع، مهمترین عوامل شکل‌گیری مرم‌های اونیکیس به‌شمار می‌روند. در همه بخش‌های منطقه مورد بررسی، مرم‌های اونیکیس به‌صورت میان لایه واحدهای مارن زیرین (سنگ خاستگاه کربناتی) و طبقه‌های تراونیکیس و تراورتن (به عنوان سرپوش بازدارنده هدررفت سریع گرما) دیده می‌شوند. نتایج تجزیه‌های شیمیایی لزوم عناصر رنگزای شناخته شده برای حل شدن در چشمه‌های آبگرم و ایجاد طیف‌های متنوع رنگی را تأیید می‌کند و برای رنگ‌هایی چون سبز و سبز مایل به زرد می‌توان به عنصر آهن به‌عنوان مهمترین عامل رنگزایی اشاره کرد. البته در مورد رنگ‌های ویژه‌تر چون طیف‌های مختلف رنگ آبی نمی‌توان قاطع به نقش اصلی عنصری مشخص در رنگزایی اشاره کرد، با اینکه حضور عناصر پدیدآورنده رنگ آبی با مقادیر قابل ملاحظه بیانگر نقش مؤثر آن‌ها در رنگزایی سنگ است. در کنار عواملی چون REE و فلزهای رنگزا به عنوان اصلی‌ترین عوامل ایجاد رنگ در نمونه‌های مورد بررسی، پدیده‌هایی چون شکست نور و تداخل امواج نوری در پی ناپیوستگی‌های ساختاری می‌توانند به‌عنوان

نماییم. همچنین از سرکار خانم دکتر منوچهری که با دانش تخصصی و تلاش‌های ارزشمند خود در بررسی میانبرهای سیال و یاری در تحلیل داده‌ها، سهمی بسزا در ارتقای کیفیت این پژوهش داشته‌اند به‌طور ویژه تشکر می‌شود.

مراجع

- [1] Nabian A., Farhadian M.B., Hamidi Anaraki Gh. "Ornamental and facing stones (in persian)", Ministry of Mines and Metals, Exploration and Mining Deputy (1991) 220 p.
- [2] Anonymous Mexican onyx, manufacture and builder 26 (1894) 254 p.
- [3] Barcena M., "Las rocas de Tecali (Puebla, Mex.)", La Naturaleza, Mexico DF (1874) 7-9.
- [4] Barcena M., "The rocks known as Mexican onyx", Academy of Natural Sciences 28 (1876) 166-168.
- [5] Lowton E.M., "Genesis and classification of Mexican onyx", mining and scientific press, San Francisco (1910) 791-792.
- [6] Ford T.D., Pedley H.M., "A review of Tufa and Travertine deposits of World", Earth-Sci. Rev., Amsterdam 41 (1996) 117-175.
- [7] Villarreal F., Vera A., "Monografia geologico-minera del estado de Puebla", Consejo de Recursos Minerales, Publ M-16 (1995) 1-139.
- [8] Kano A., Okumura T., Takashima C., Shirashi F., "Geomicrobiological properties and processes of travertine", Springer Geology, 176 (2019) 9-41.
- [9] Pentecost, A. Travertine, Springer-verlag, Netherlands (2005) 445 p.
- [10] Tarah J., Aedpour Z., Mirhoseini M., "Determination of Travertine out crop types in Tazerj (Northern Hormozgan) using mineralogy and Geochemical data", Iranian Journal of Earth Sciences 6 (2014) 99-107.
- [11] Cheraghi A., "Identification and selection of building stones (in persian)", Noavar Publications (2018) 120 p.
- [12] Marble institute of America, marble and onyx, an excerpt from the dimension stone design manual, (2011) version 7.2.
- [13] Iranian National Standard No. 14704, Stone Products – Definitions and Classification, (in persian). (2012) 15 p.

مکمل‌های رنگ‌ساز در نظر گرفته شوند. شواهد به دست آمده چون اندازه کوچک میانبرهای سیال (کمتر از ۲۰ میکرون)، شوری کم سیال‌های کانه‌ساز (۱۰-۲ wt.%NaCl)، دمای همگنی ۲۸۰-۱۳۲ درجه سانتی‌گراد، حضور میانبرهای دوفازی غنی از آب و CO₂، همراهی با پدیده‌های زمین ساختی و قرارگرفتن در گستره کانسارهای فراگرمایی نشان می‌دهد که سردشدگی، حباب‌زایی (جوشش)، آمیزش سیال‌های دگرگونی، دریایی و تا حدی جوی و در پایان واکنش سیال‌ها با سنگ میزبان کربناتی و تغییر ترکیب شیمیایی سیال سبب ته‌نشست کانسارهای مورد بررسی شده است.

انجام این پژوهش با محدودیت‌هایی چون نبود دسترسی به واحدهای کامل مرمراونیکس همراه بوده که در اصل مرمراونیکس‌ها در بخش زیرین و به صورت میان‌لایه با واحدهای دیگر تشکیل می‌شوند و فقط در برش‌های معادن و رخنمون‌ها در دسترس و قابل نمونه برداری هستند. بخش‌های برداشت شده نیز به فروش رفته و در دسترس نیستند. مقدار آب به عنوان یک شاخص بسیار مهم در تعیین کیفیت و رنگ سنگ مرمراونیکس محسوب می‌شود، که بعلاوه وجود مواد فرار زیاد در مرمراونیکس‌ها (جز CO₂) اغلب محاسبه مقدار دقیق آن مشکل است. مقادیر کم REE با وجود اثر قابل توجه در رنگ سنگ، در این مرمراونیکس‌ها بسیار کم بوده و اندازه‌گیری آنها نیازمند بکارگیری ابزارهای اندازه‌گیری با حساسیت بسیار بالاست. همچنین برخلاف پژوهش‌های گسترده صورت گرفته پیرامون تراورتن‌ها، بررسی‌های بسیار محدودی در مورد مرمراونیکس‌ها انجام شده است و این امر چالش‌های نبود مراجع بروز و ممکن نبودن قیاس داده‌های مورد بررسی را ایجاد کرده است. بررسی ایزوتوپی کربن و اکسیژن برای تعیین آب و کربن تشکیل دهنده و نیز مقایسه ترکیب‌های مرمراونیکس با هم و با تراورتن‌های همراه پیشنهاد می‌شود.

قدردانی

لازم است مراتب سپاس و قدردانی عمیق خویش را از اساتید ارجمند، جناب آقای دکتر علیرضایی و جناب آقای دکتر مسعودی، به‌سبب راهنمایی‌های ارزشمند و حمایت‌های علمی بی‌دریغ ایشان در طول انجام این پژوهش، صمیمانه ابراز

- [25] Taylor S. R., McLennan S.M. "The geochemical evolution of the continental crust", Reviews of geophysics 33 (1995) 151-265.
- [26] Haj Alilou B., "Fluid inclusion geothermometry (in persian)", Payame Noor University Press, (2011) 309 p.
- [27] Gandin A., Capezzuoli E., "Travertine versus calcareous tufa: distinctive petrologic features and stable isotope signature. Il Quaternario", Italian Journal of Quaternary Sciences 21(2008) 125-136.
- [28] Capezzuoli E., Gandin A., Pedley M., "Decoding tufa and travertine: fresh water carbonates, in the sedimentary", record: The state of the art, Sedimentology, 61(2014) 1-21.
- [29] Frisia S., Borsato A., McDermott F.P., Fairchild I., "Calcite Fabrics, Growth Mechanisms, and Environments of Formation in Speleothems from the Italian Alps and Southwestern Ireland", Journal of Sedimentary Research 70(2000) 1183-1196.
- [30] Bondina S.S., Ananyev S.A., Ananyeva T.A., "Concretion onyx of the Torgashno deposit-new type of carbonate vein onyx (Krasnoyarsk Territory)", Journal of Siberian Federal University, Engineering & Technologies 7 (2013) 769-773.
- [31] Barker S.J., Perna S., "Alabaster quarrying and trade in the Roman World: Evidence from Pompeii and Herculaneum", Interdisciplinary studies on ancient stones : proceedings of the XI ASMOSIA International Conference (2018) 45-64.
- [32] Haj Alilou B., "Gemology (in persian)", Payame Noor University Press, (2007) 340 p.
- [33] Burns R.G., "Mineralogical applications of Crystal field theory", Cambridge University Press, Cambridge (1970).
- [34] Dowty E., Clark J.R., "Crystal structure refinement and optical properties of a Ti^{3+} fassaite from the Allende meteorite", American Mineralogist, 58 (1973) 230-242.
- [35] Nasseu K., "The origins of color in minerals", American Mineralogist, 63(1978) 219-229.
- [36] Omidyani S., Torabi S., "A review of the main factors causing color in gemstones (in persian)", International Specialized Congress on Earth Sciences (2015).
- [14] Momenzadeh M., Heidari A., "Geographical and stratigraphic distribution of ornamental and facing stones in Iran", First Seminar on Ornamental and Facing Stones of Iran (1988).
- [15] Hosseini H., Aghababayi H., "Geological conditions and determination of physical and chemical properties of Azarshahr travertines (in persian)", Earth Sciences Quarterly 16 (2006) 62.
- [16] Sartibi H.H., Haqfarshi A., "1:100,000 scale geological map of Sanandaj", Geological Survey and Mineral Exploration of Iran (2005).
- [17] Hosseini M., Mousavi F., Karimi-Nia M., "Geological Map Report 1:100,000, Qorveh", Geological Survey and Mineral Explorations of Iran (1999).
- [18] Roshan Ravan J., Sabzehei M., Nazemzadeh M., Navazi M., "1:100,000 scale geological map of Dehshir", Geological Survey and Mineral Exploration of Iran (1996).
- [19] Rahbar Y., Nabavi M.H., "Characteristics of Azarshahr travertines (in persian)", First Seminar on Ornamental and Facing Stones of Iran (1988).
- [20] Ghadirzadeh A., "1:100,000 scale geological sheet of Azarshahr", Geological Survey and Mineral Exploration of Iran (2002).
- [21] Javadi Angarabi M., "Mineralogy, geochemistry, and economic geology of travertines in Dashkasan 3 area, Azarshahr, East Azerbaijan (in persian). Master's Thesis", Payame Noor University, Tabriz Center, (2018) 59 p.
- [22] Rahmani S., "Sedimentary environment and geochemistry of travertine-bearing rock units in the western part of the Central Iran and Sanandaj-Sirjan zones (in persian)", Master's Thesis, Bu-Ali Sina University, (2011) 154 p.
- [23] Spasovski O., Doneva B., Spasovski D., "Mineralogical-Petrographic and Physical-Mecanical characteristics of the travertine an onyx from Besiste Vilage (Western Macedonia)", Geologica Macedonia 30 (2016) 23-31.
- [24] Khrissi S., Haddad M., Bejjit Ait Lyazidi S., Amraoui M. El., Falgueres C., "Raman and XRD Characterization of Moroccan marbles", IOP conf. Ser. Mater. Sci. Eng 186 (2017) 19-21.

- [39] Roedder E., "*Fluid inclusions, Reviews in mineralogy*", Mineralogical Society of America, Washington 12 (1984) 644 p.
- [40] Wilkinson J.J., "*Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits*", Lithos 55 (2001) 229-272.
- [37] Goreva J.S., Chi M., Rossman G.R., "*Fibrous nano-inclusion in massive rose quartz: The origin of rose coloration*", American Mineralogist 86 (2001) 466-472.
- [38] Ahmad S.N., Rose A.W., "*Fluid inclusions in porphyry and skarn ore at Santa Rita*", New Mexico. Economic geology 75(1980) 229-250.