

ویژگی‌های گوهرشناسی و کانی‌شناسی دمانتوئیدهای جنوب کرمان

مسعود کیانی^۱، سهیلا ساکی^{۲*}، فرشاد کیوانی^۱، حدیث صادقی^۳

۱- موسسه گوهرشناسی کیپا، کیان پارس تئیس، تهران، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی پترولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۳- موسسه گوهرشناسی تحسین، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰، نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲)

چکیده: برای نخستین بار در سال ۱۳۸۰، گارنت دمانتوئیدهای ایران در استان کرمان و در پهنه زمین‌شناسی سندرچ - سیرجان کشف شدند. سنگ میزبان این دمانتوئیدها پریدوتیت سرپانتینی شده افیولیت حاجی‌آباد (اسفندقه) است. ویژگی‌های گوهرشناسی این دمانتوئیدها شامل شکل بلوری منظم، رنگ زرد مایل به سبز تا سبز تیره، ضریب شکست ۱/۸۰ تا ۱/۸۲ و وزن مخصوص ۳/۸۱ تا ۳/۸۳ است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی این نمونه‌ها نشان می‌دهد که عنصر کروم عامل اصلی رنگ آن‌هاست. میانبارها در گوهرسنگ‌ها یک شاخص مهم از ماهیت سنگ هستند و ممکن است که ویژگی‌های خاستگاه آن‌ها را نشان دهد. بررسی ویژگی‌های میکروسکوپی این گارنت دمانتوئیدها از جمله وجود میانبارهای سوزنی و دم اسبی، سنگ میزبان سرپانتینی را برای آن‌ها تایید می‌کند. نتایج تجزیه شیمیایی با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان می‌دهد که عناصر O, C, Fe, Ca, Si, Mg و Al اجزای اصلی گارنت‌های مورد بررسی هستند. طیف رامان نمونه‌های مورد بررسی، با طیف مرجع دمانتوئید همخوانی دارد. همچنین با بررسی‌های انجام شده می‌توان گفت که دمانتوئیدهای جنوب کرمان مانند گارنت‌های روسی، ایتالیایی و پاکستانی خاستگاه سرپانتینی دارند.

واژه‌های کلیدی: دمانتوئید؛ گوهرشناسی؛ سرپانتین؛ جنوب کرمان؛ رامان.

مقدمه

بالا این ماده را دمانتوئید (الماس مانند) نامید. نخستین ذخیره از این کانی در سال ۱۸۵۳ در کوه‌های روسیه کشف گردید که تا سال ۱۹۱۷ نماد جواهری روسیه شناخته می‌شد [۳]. در سال‌های اخیر، ذخایر ارزشمندی از این گوهر در کشورهای روسیه، ایتالیا، ماداگاسکار، نامیبیا و پاکستان کشف گردیده است [۲، ۴-۸] (شکل ۱). بیشتر گزارش‌ها در مورد دمانتوئید بر رخداد آن، شیمی بلور و ویژگی‌های گوهرشناسی آن متمرکز هستند [۹-۱۵]. دمانتوئید با کیفیت گوهری اغلب در دو محیط زمین‌شناسی بسیار متفاوت یافت می‌شود [۸]: ۱) سرپانتینیت (مانند استان کرمان در ایران، وال مالنکو در ایتالیا، دره کاغان در پاکستان، و کوه‌های اورال در روسیه) و

آندرادیت با فرمول شیمیایی $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ یکی از شش گونه اصلی گروه گارنت است [۱]. این کانی خود دارای سه گونه شامل دمانتوئید، ملانیت و توپازولیت است که همراه اسکارنها یا سرپانتینیت‌های دگرگون شده تشکیل می‌شوند. کانی دمانتوئید به رنگ سبز یکی از باارزش‌ترین این گارنت‌هاست. علت رنگ سبز این کانی، حضور کروم در ساختار آن است. در سال ۱۸۵۳، کانی شناس فنلاندی، نیلز گوستاف نوردنسکیولد، نخست دمانتوئید را به عنوان گونه جدیدی از آندرادیت از نیژنی تاگیل در کوه‌های اورال مرکزی روسیه توصیف کرد [۲]. او به دلیل درخشندگی بی‌مانند و پراکندگی

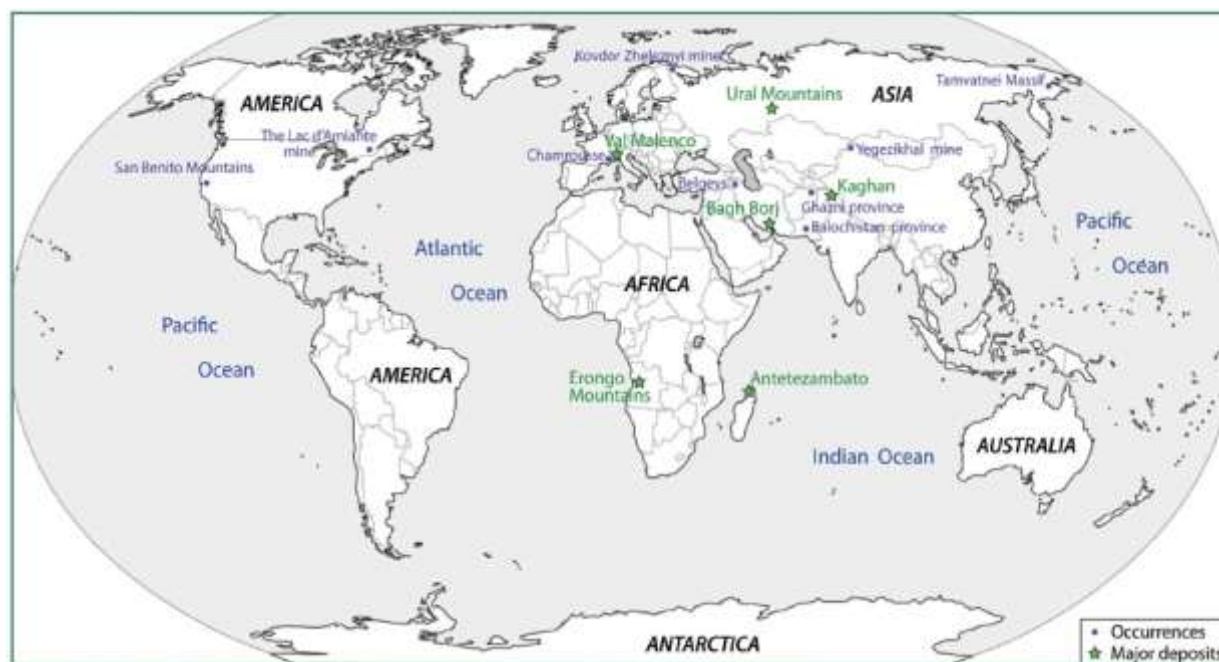
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۳۷۶۱۹۰۷۸۴، پست الکترونیکی: saki1390@gmail.com



نشان می‌دهند. راه‌های روستایی بسیار ناهموار است و در فصل زمستان نمی‌توان با ماشین رفت و آمد کرد. از دیگر نواحی دارای گارنت که توسط ساکنان محلی سایر روستاهای این منطقه استخراج شده است می‌توان به سولویه، روزدر، آبدشت، سرگز، عنبرآباد، فتح آباد، دولت آباد و وکیل آباد اشاره کرد [۱۸]. با این حال، دمانتوئید با کیفیت جواهری هنوز در بیشتر این مکان‌ها یافت نشده است. تقریباً همه تولیدهای مهم تجاری از کوه‌های پیرامون باغ برج استخراج شده است (شکل ۲ پ). در حال حاضر تولید سالانه دمانتوئید از منطقه باغ برج چند هزار گرم مواد خام با کیفیت‌های مختلف برآورد می‌شود [۱۸]. نمونه‌های مرغوب افزون بر اینکه در کشور به عنوان جواهر استفاده می‌گردند، هم به صورت سنگ‌های راف و هم تراش خورده به اروپا، هند و چین صادر می‌شوند. در این پژوهش، ویژگی‌های کانی‌شناسی و گوهرشناسی دمانتوئیدهای با میزبان سرپانتینیت در نزدیکی روستای باغ برج در بخش سوغان جنوب استان کرمان با ریزطیف‌سنج رامان لیزری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) شناسایی شده است.

۲) اسکارن (چون ماداگاسکار و ارونگو در نامیبیا). بیشتر دمانتوئیدهای سرپانتینیت دربردارنده سوزن‌ها بسیار ظریف و اغلب منحنی شکل هستند که به طور عمده از کریزوتیل، $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ ، عضوی از گروه کائولینیت-سرپانتین تشکیل شده اند. این میانبارها مشخصه دمانتوئیدهای ایران، ایتالیا، پاکستان و روسیه هستند [۱۶]. نخستین بار دمانتوئید در اکتبر سال ۲۰۰۱ در جنوب ایران در استان کرمان گزارش گردید [۳]. گارنت دمانتوئیدهای این منطقه همراه سنگ‌های سرپانتینیتی مجموعه افیولیتی اسفندقه در جنوب کرمان یافت می‌شوند. [۱۷] تعدادی از گارنت دمانتوئیدهای این منطقه از نوع گارنت‌های سبز با پدیده چشم گربه معرفی شده‌اند. با این حال، تنها سنگ‌های بسیار کمی از این محل تراش خورده و در تجارت گوهرسنگ‌ها ظهور یافته‌اند.

منطقه مورد بررسی بین شهرهای جیرفت و بافت در استان کرمان در حدود ۹۶۰ کیلومتری جنوب شرقی تهران قرار دارد. دمانتوئید مرغوب نخستین بار در نزدیکی باغ برج که در منطقه‌ای سردسیر و کوهستانی قرار دارد، یافت شد. شکل‌های ۲ الف و ب تصاویری از برخی معادن دور افتاده در منطقه را



شکل ۱ نقشه نشان دهنده پراکندگی گارنت دمانتوئید در سراسر جهان برگرفته از مرجع [۱۹].



شکل ۲ الف و ب) تصاویری از معادن محلی در باغ برج، پ) تصاویری از نمونه‌های راف منطقه مورد بررسی.

زمین‌شناسی منطقه

افیولیت حاجی آباد که افیولیت اسفندقه [۲۰] نیز شناخته می‌شود با گسترش ۲۰۰۰ کیلومتر مربع بخشی از افیولیت‌های لبه روراندگی زاگرس است که در جنوب کرمان در پهنه سنندج سیرجان قرار دارد (شکل ۳) و به شدت در معرض دگرسانی و فعالیت‌های زمین‌ساختی و دگرگونی قرار گرفته است. این مجموعه فرامافیک - مافیک خود بخشی از افیولیت‌های تتیسی اواخر کرتاسه شرق مدیترانه است که از عمان تا قبرس ادامه دارند و طی کوهزایی آلپ هیمالایا جایگیری کرده‌اند [۲۱-۲۳].

واحدهای سنگی این افیولیت شامل پریدوتیت‌های سرپانتینی شده (دونیت، هارزبورژیت و لرزولیت)، گابرو، سنگ‌های آتشفشانی و سنگ‌های رسوبی هستند که توسط پژوهشگران مختلفی بررسی شده‌اند [۲۴-۲۸]. بررسی‌های سنگ‌نگاری پریدوتیت‌های سرپانتینی شده میزبان گارنت‌های

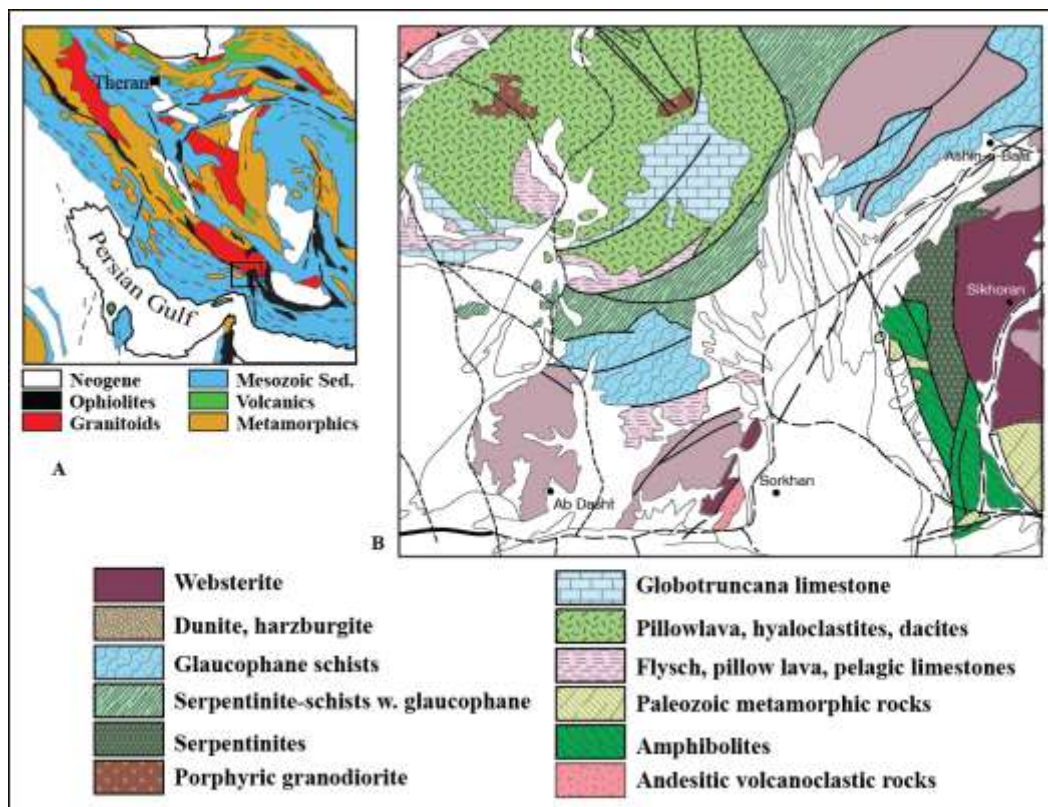
سبز در این منطقه نشان می‌دهد که این سنگ‌ها دارای کانی‌های کریزوتیل، آنتی‌گوریت، لیزاردیت، کرومیت، کلسیت، مگنتیت، کلریت و گارنت هستند. گارنت‌های سبز افیولیت حاجی آباد پیرامون روستای باغ برج و در بخش‌های به شدت دگرسان شده سرپانتین‌های آزیست دار دیده می‌شوند. گارنت‌ها در این منطقه به صورت خوشه‌ای، تک‌بلور برجا وجه‌دار یا بلورهای بی‌وجه به صورت پلاسری درون آبراهه‌ها یافت می‌شوند (شکل ۴).

روش کار

پس از جداسازی بلورهای گارنت‌های سبز منطقه مورد بررسی، تعداد ۲۰ نمونه بلور سالم در موسسه گوهرشناسی گوهر شناسی کیپا تراش تهران سریع داده شدند. سپس آنها با دستگاه‌های گوهر شناسی از جمله میکروسکوپ گوهر شناسی، قطبش‌نما، شکست سنج، رنگ‌نما، طیف‌نگار، ترازوی SG و

دانشگاه صنعتی شریف و و طیف سنج میکرو رامان با لیزر با طول موج ۵۳۲ نانومتر، گستره طیف سنجی: $4000-100\text{ cm}^{-1}$ وضوح طیف سنجی 6 cm^{-1} ، پهنای لیزر در نیم شدت بیشینه 0.02 nm (FWHM) در دانشگاه صنعتی شاهرود، انجام شد.

دستگاه فرابنفش موج کوتاه بررسی شدند. همچنین شناسایی فازهای درونی و عناصر شیمیایی نمونه‌های مورد بررسی با میکروسکوپ الکترونی روبشی-گسیل میدانی (FESEM، مدل TeScan – Mira III) بر نمونه‌های با پوشش طلا در



شکل ۳ الف- نقشه زمین‌شناسی ایران نشان‌دهنده پراکندگی افیولیت‌ها و جایگاه منطقه مورد بررسی که با علامت مربع مشخص شده است. ب- زمین‌شناسی منطقه سرخان که توده‌های فرامافیک دربردارنده عدسی‌های مگنیزیت و آمیزه‌هایی که توسط شیست‌های سرپانتینی دارای گلوکوفان تشکیل شده‌اند را نشان می‌دهد.

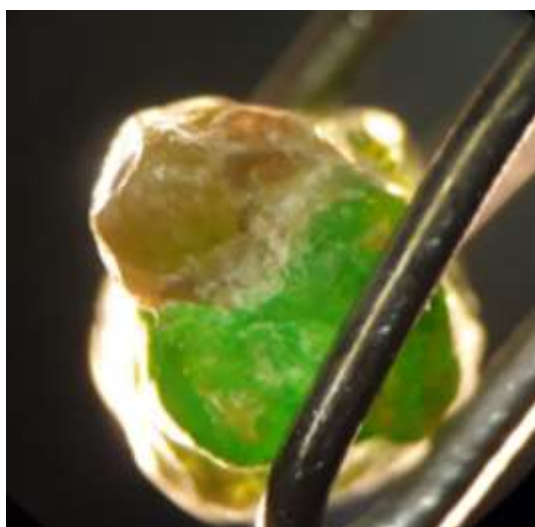


شکل ۴ تصاویری از گارنت دیمانتونیدهای جنوب کرمان که برخی از نمونه‌ها به خوبی رشد کرده‌اند و شکل دوازده وجهی لوزی را نشان می‌دهند.

گوهر شناسی

از نظر کانی شناسی، نمونه های مورد بررسی به صورت خوشه ای و تک بلور دیده می شوند. شکل بلوری گارنت دمانتوئیدهای برجا که به خوبی رشد کرده اند لوزی شکل دوازده وجهی (شکل ۴) بوده که اندازه آنها از یک میلیمتر تا ۳ سانتی متر متغیر است و در تعدادی از نمونه ها، حالت دوقلویی (ماکل) نمایان بوده (شکل ۵) و رنگ آنها از زرد مایل به سبز تا سبز سیر متغیر است. چکیده ای از ویژگی های گوهرشناسی نمونه های مورد بررسی در جدول ۱ آمده است. این گارنت ها نیمه شفاف بوده و از نظر ویژگی های نوری دارای ضریب

شکست فروسرخ (IR) تا ۱/۸۰ تا ۱/۸۲ هستند، همچنین وزن مخصوص آنها از ۳/۸۱ تا ۳/۸۳ است. میانبرهای این گارنت‌ها بیشتر شامل کانی‌های رشته‌ای سرپانتین، کرومیت، اثر انگشت و منفی بلور هستند. کانی کریزوتیل در این گارنت‌ها به صورت رشته‌های مو مانند پراکنده یا انبوهه‌ای به صورت دم اسبی دیده می‌شود. از میانبرهای شاخص این گارنت‌ها می‌توان به اثر انگشت و میانبرهای دو فازی (مایع-گاز) اشاره کرد. در این گارنت‌ها، اثر انگشت‌ها به دو صورت ریز و درشت دیده می‌شوند (شکل ۶).



شکل ۵ تصویری از ماکل در دمانتوئیدهای ناحیه جنوب کرمان (بزرگنمایی ۴۰×).

جدول ۱ مشخصه‌های گوهرشناسی دمانتوئیدهای جنوب کرمان.

[illegible]

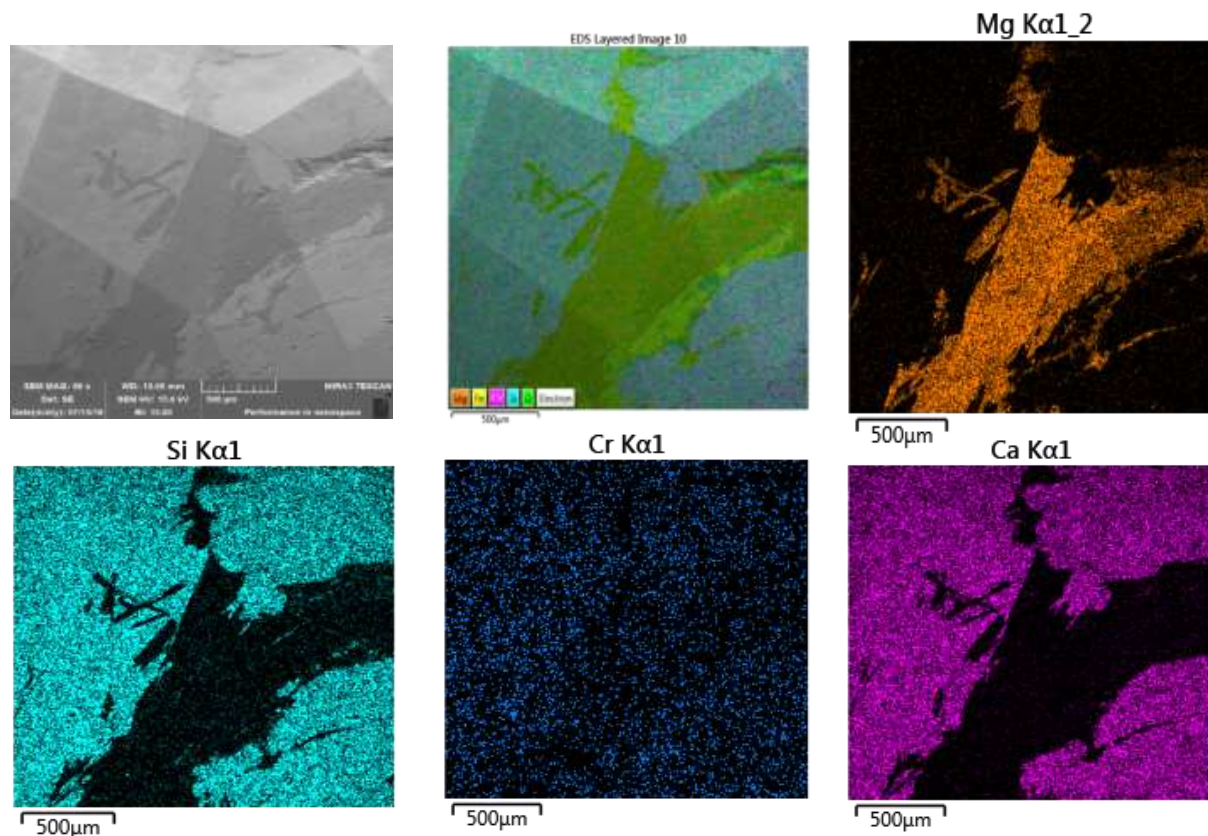


شکل ۶ انواع رنگ‌های دمانتوئیدهای ناحیه جنوب کرمان.

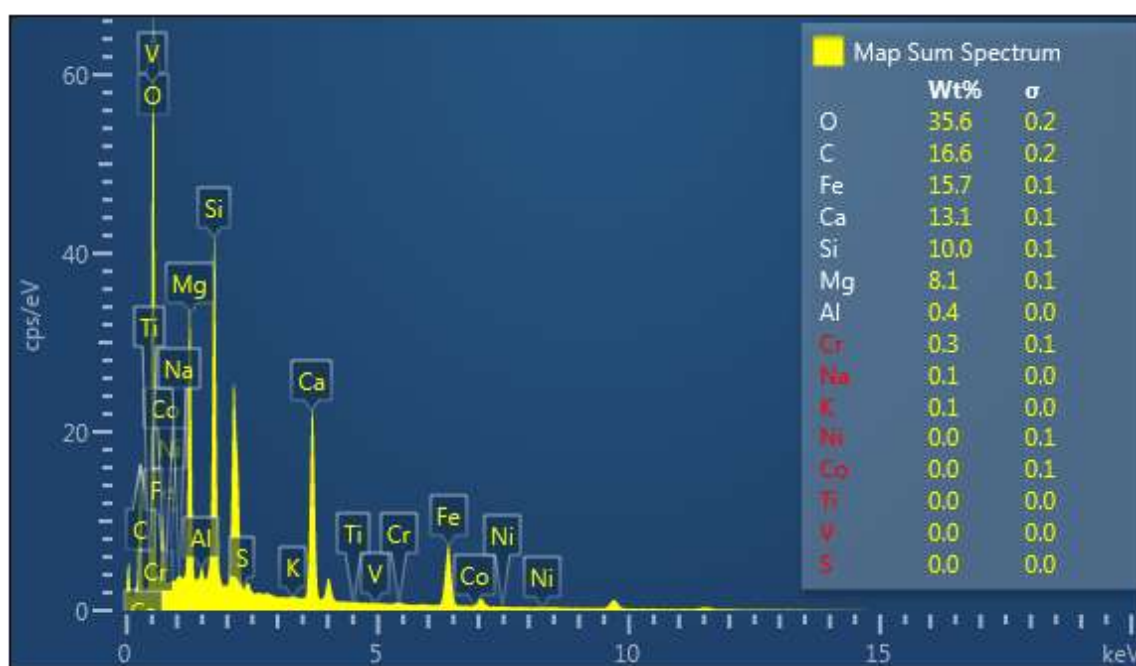
بررسی‌های میکروسکوپی الکترونی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی حضور میانبارهای سوزنی و دم اسبی آریست را در نمونه‌های مورد بررسی نشان می‌دهند. این میانبارها نسبت به زمینه تیره‌تر هستند (شکل ۷). در این تصاویر، آریست‌ها به صورت رشته‌های تیره مشخص هستند. تصاویر تجزیه نقشه‌ای از نمونه مورد بررسی نشان می‌دهد که انباشت اکسیژن، منیزیم و آهن در نواحی آریست دار بیشتر بوده و بر عکس انباشت عناصر Si و Ca در زمینه گارنت بیشتر است. همچنین بر پایه این تصاویر، عنصر کروم در نمونه‌های

مورد بررسی به صورت یکنواخت حضور دارد. نتایج تجزیه شیمی به روش SEM نشان می‌دهد که O, C, Fe, Ca, Si, Mg و Al عناصر اصلی تشکیل دهنده گارنت‌های مورد بررسی هستند و Cr نخستین عنصر فرعی آنهاست و از عناصر Ni, V, Ti و CO تهی هستند. این گارنت‌ها دارای مقدار Wt% $Mg_{35/6}$ و $Fe_{8/1}$ در قسمت تیره تر متمرکز می‌باشند. همچنین Si با مقدار ۱۰ Wt% و Ca به مقدار ۱۳/۱ Wt% در زمینه بیشتر هستند (شکل ۸).



شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی که میانبارهای سوزنی و دم اسب آریستی به صورت نوارهای تیره در نمونه‌های مورد بررسی را می‌دهند.

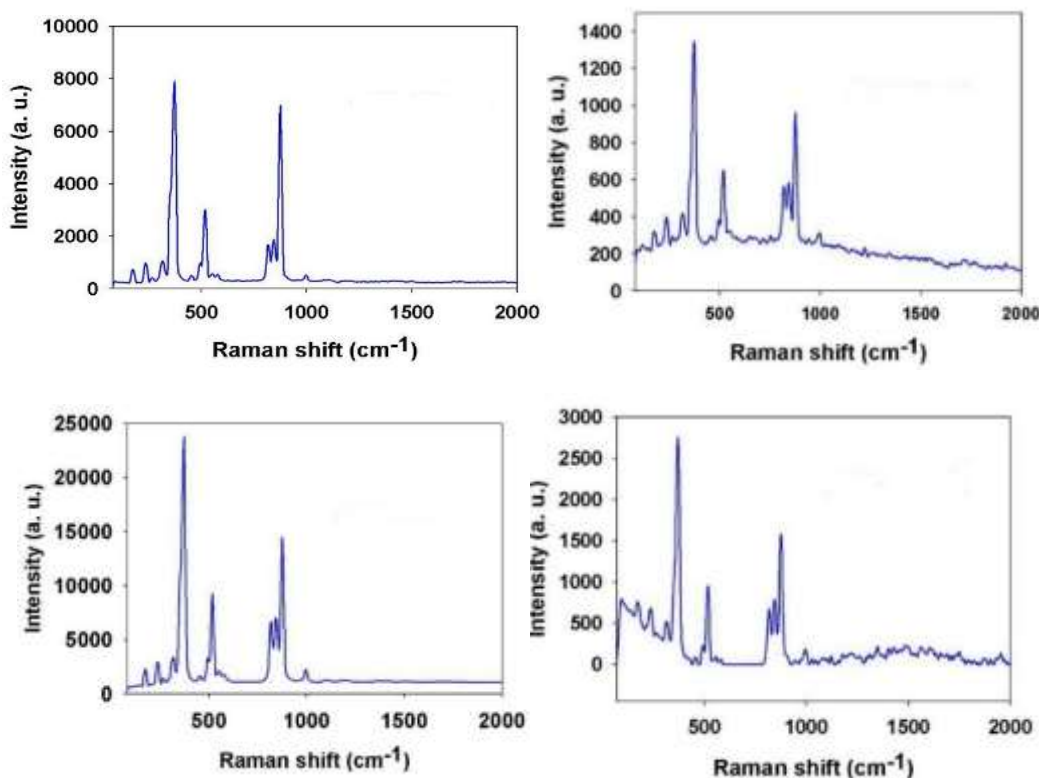


شکل ۹ عناصر اصلی گارنت جنوب کرمان.

طیف سنجی رامان

طیف‌سنجی رامان یک روش پراکندگی نور غیرکشسان است که به طور گسترده برای بررسی ویژگی‌های نوسانی جامدها، مایع-ها و گازها استفاده می‌شود [۳۰، ۲۹]. اثر رامان نخستین بار در سال ۱۹۲۸ گزارش شد [۳۱]. کار دوم که بعد در همان سال منتشر شد، پیشتر پراکندگی رامان را در نمونه‌های کانی‌شناسی توصیف کرده بود [۳۲] اما بیشتر برای چند دهه تنها برای بررسی‌های فیزیک و شیمی استفاده می‌شد. به طور کلی، تنها چند تجزیه و تحلیل محدود بر کانی‌ها می‌توانست انجام شود، زیرا طیف‌سنج رامان به هیچ میکروسکوپی متصل نبود، و از این رو اندازه‌گیری کانی‌های کوچک کار پیچیده و دشواری بود. در اواسط دهه ۱۹۷۰ زمانی که نخستین میکروسکوپ‌های رامان در فرانسه [۳۴، ۳۳] در دسترس بودند، شرایط تغییر کرد و در ایالات متحده آمریکا [۳۶، ۳۵] میکروسکوپ‌های بسیار مناسب برای بررسی‌های گهرشناسی (با وضوح فضایی حدود m_1) ساخته شد. مدت کوتاهی پس از آن، کاربرد این روش در گهرشناسی آغاز شد [۳۷]. از دهه ۱۹۹۰، اندازه طیف‌سنج‌های رامان کوچک‌تر، آشکارسازهای آنها حساس‌تر (مانند افزاره بار جفت شده، CCD) و مقرون به صرفه‌تر شدند. از آن زمان تاکنون، استفاده از این ابزارها در آزمایشگاه‌های

گهرشناسی به تدریج افزایش یافته است. اگرچه سال‌ها از طیف‌سنجی رامان برای بررسی‌های کانی‌شناسی استفاده شده است (برای مثال [۳۹، ۳۸]) اما روشی به نسبت جدید در بیشتر آزمایشگاه‌های گهرشناسی است. با این وجود، چند پژوهشگر ریزطیف‌سنجی رامان را ابزاری عالی برای تجزیه و تحلیل غیرمخرب میانبارها در سنگ‌های قیمتی توصیف کرده‌اند [۴۰-۴۲]. اثر جابه جایی رامان اندازه‌گیری شده با این ابزار به دلیل ارتعاش‌های مولکولی درون یک ماده، در معرض یک منبع نور شدید تک‌رنگ، اغلب یک لیزر مرئی، است [۴۴، ۴۳]. کانی‌های با ساختارهای بلوری متفاوت را می‌توان به کمک قله‌های مختلف در طیف‌های رامان آنها تفکیک کرد [۴۵]. با این حال، حتی کانی‌های هم‌ریخت (یعنی کانی‌های با ساختار بلوری مشابه اما ترکیب‌های شیمیایی متفاوت) را می‌توان با تجزیه و تحلیل رامان از هم تفکیک کرد (برای مثال [۴۶، ۴۷]). در این پژوهش، طیف‌سنجی رامان بر ۴ نمونه دمانتوئید جنوب کرمان انجام شد که نتایج آن در شکل ۹ آورده شده است. افزون بر این، نتایج طیف‌سنجی رامان نمونه‌های دمانتوئید جنوب کرمان با طیف مرجع دمانتوئید در شکل ۱۰ مقایسه گردیده‌است. چنان که دیده می‌شود، طیف‌های رامان این پژوهش همخوانی خوبی با طیف مرجع دمانتوئید دارند.

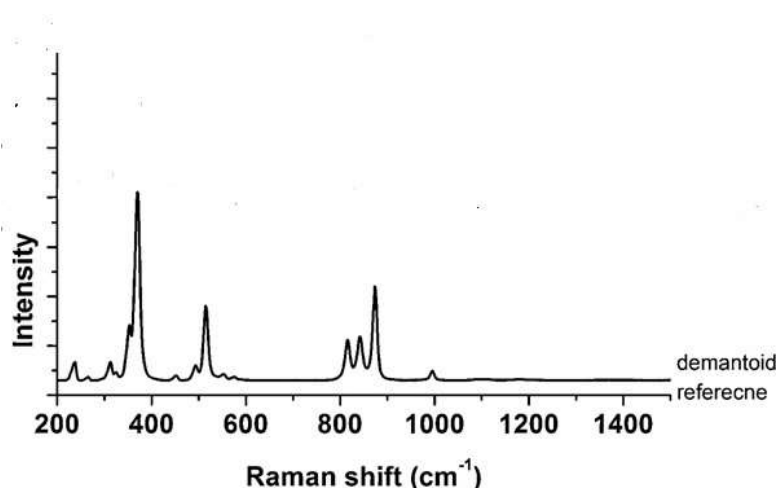


شکل ۱۰. طیف‌های رامان نمونه‌های دمانتوئید جنوب کرمان.

بحث

گارنت‌های دمانتوئیدی دارای دو نوع ذخیره هستند [۴۸]: نوع اول شامل گارنت‌های دمانتوئیدی با سنگ میزبان سرپانتینیتی (مانند ذخایر دمانتوئید روسیه، ایتالیا و پاکستان [۳، ۹، ۴۹]) و نوع دوم شامل ذخایر با سنگ میزبان اسکارن است (همانند ماداگاسکار و نامیبیا) [۵۰، ۵۱]. در اصل سنگ‌های سرپانتینیتی همراه افیولیت‌ها طی فرایندهای زمین ساختی و جایگزینی در کرانه قاره‌ها دچار فرایندهای دگرگونی و دگرسانی متعدد می‌گردند که این فرایندها خود عامل اصلی تشکیل این گارنت‌ها هستند. مهمترین میانبار در گارنت‌های نوع سرپانتینیتی رشته‌های کانی آزیست است [۴۹، ۵۲]. کانی آزیست به صورت مویی یا دم اسبی در دمانتوئیدهای جنوب کرمان بسیار یافت می‌شود که یکی از شاخص‌های خاستگاه سرپانتینی این گارنت‌هاست. این گارنت‌ها بر خلاف گارنت‌های روسیه که دارای کانی دیوپسید هستند [۱۲] بدون این کانی بوده و به دمانتوئیدهای ایتالیا و پاکستان شبیه هستند (شکل ۱۱). چنان که پیشتر اشاره شد، دمانتوئیدهای مورد بررسی دارای کانی‌های کدر با جلای فلزی هستند که با توجه به حضور معادن کرومیت متعدد در منطقه مورد بررسی [۵۳-۵۵]

می‌توان گفت که این کانی‌های کدر، کرومیت هستند. اثر انگشت‌ها در دمانتوئیدهای مورد بررسی شامل دو نوع درشت و ریز هستند که می‌توان گفت که نوع درشت مربوط به فعالیت‌های زمین‌ساختی شدید، و انواع ریز به فعالیت‌های زمین‌ساختی ضعیف‌تر مربوط هستند که در کانی شکستگی‌ها با سیال‌های ثانویه پر شده‌اند. بر پایه بررسی‌های انجام شده، مقدار عنصر C در نمونه‌ها ۱۶۶ Wt% است که با توجه به حضور اثر انگشت‌های درشت و ریز پر شده در این دمانتوئیدها، می‌توان به حضور این سیال‌ها مربوط دانست. این بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهند که عنصر کرومیوم با مقدار Wt% ۰/۳ به صورت یکنواخت در کل کانی پراکنده بوده و عامل رنگ سبز در این دمانتوئیدهاست. مقدار عنصر کلسیم دمانتوئیدهای مورد بررسی ۱۳/۱ Wt% است که با توجه به گزارش‌های پیشین [۵۶، ۵۷] می‌توان گفت که یون کلسیم برای تشکیل این گارنت‌ها می‌تواند طی دگرسانی‌های شدید سنگ‌های پریدوتیتی کانی‌های فرومنیزین کلسیم‌دار (سری دیوپسید در پیروکسن‌ها) تامین شده باشد و سپس این کلسیم آزاد شده در اثر سیال‌ها وارد کانی‌های کلسیم‌دار می‌شود.



شکل ۱۱ طیف رامان مرجع دمانتوئید (برگرفته از مرجع [۵۲]).

برداشت

گارنت دمانتوئیدهای جنوب کرمان از شناخته شده‌ترین انواع دمانتوئیدها در جهان هستند. این گوهرها دارای شکل بلوری منظم و رنگ سبز تا زرد مایل به سبز و ضریب شکست نوری ۱/۸۰ تا ۱/۸۲ و همچنین وزن مخصوص ۳/۸۱ تا ۳/۸۳ هستند. بررسی ویژگی‌های میکروسکوپی این دمانتوئیدها از جمله وجود میانبارهای سوزنی و دم اسبی در آن‌ها، وجود سنگ میزبان سرپانتین را برای آنها تأیید می‌کند. تجزیه شیمی با SEM نشان می‌دهد که O, C, Fe, Ca, Si, Mg و Al عناصر اصلی تشکیل دهنده گارنت‌های مورد بررسی هستند و Cr نخستین عنصر فرعی این گارنت‌هاست که طی دگرسانی سنگ‌های پریدوتیتی کرومیت‌دار از آنها خارج شده و در مراحل رشد بلورهای دمانتوئید وارد ساختار این کانی شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی این نمونه‌ها نشان می‌دهد که عنصر کروم عامل رنگ است. سنگ‌های سرپانتین با افیولیت‌ها طی فرآیندهای زمین‌ساختی و جایگزینی در کرانه قاره‌ها در معرض فرآیندهای دگرگونی و دگرسانی مختلفی قرار می‌گیرند که این فرآیندها عامل اصلی تشکیل این گارنت‌ها هستند.

قدردانی

بدین‌وسیله از جناب آقای ابراهیم برهانی اناری، از فعالین حوزه گوهرسنگ، و جناب آقای محمدرضا درخشان، مدیر آموزشگاه

گوهر پارسی کرمان برای ارائه تصاویر صحرایی و نمونه‌های دستی صمیمانه تشکر می‌کنیم.

مراجع

- [1] O'Donoghue M., "Gems, 6th edn", Butterworth- Heinemann, Oxford, (2006) 874 pages.
- [2] Eichmann E., Nils von Nordenskiöld. "Transactions of the St". Petersburg Emperor's Mineralogical Society, Series 2, 5, (1870) 189–192.
- [3] Phillips W.R., Talantsev A.S., "Russian demantoid, czar of the garnet family", Gems & Gemology, 32, (2), (1996) 100–111, <http://dx.doi.org/10.5741/gems.32.2.100>.
- [4] Du Toit G., Mayerson W., van der Bogert C., Douman M., Befi R., Koivula J.I. and Kiefert L., "Demantoid from Iran", Gems & Gemology, 42(3), (2006) 131.
- [5] Quinn E.P., "Gem News International: Demantoid from northern Pakistan", Gems & Gemology, 41(2), (2005) 176–177.
- [6] Lind Th., Henn U., Bank H., "New occurrence of demantoid in Namibia", Australian Gemmologist, 20 (2), (1998) 75–79.
- [7] Pezzotta F., Adamo I., Diella V., "Demantoid and topazolite from Antetazambato, northern Madagascar: Review and new data", Gems & Gemology, 47, (1), (2011) 2–14, <http://dx.doi.org/10.5741/gems.47.1.2>.

- Iran: A Mineralogical and Gemmological Overview”, The Journal of Gemmology, 38 (4), (2022), 329–347, <https://doi.org/10.15506/JoG.2022.38.4.329>.
- [19] Giuliani G., Pignatelli I., Fallick A., Boyce A., Andriamamonjy A., Razafindratsimba S., Khan, T. “Gem andradite garnet deposits demantoid variety”, InColor, 36, (2017) 28-39.
- [20] Shafaii Moghadam H., Stern R.J., “Geodynamic Evolution of Upper Cretaceous Zagros Ophiolites: Formation of Oceanic Lithosphere above a Nascent Subduction Zone”, Geological Magazine, 148, (2011) 762-801. <http://dx.doi.org/10.1017/S0016756811000410>
- [21] Shafaii Moghadam H., Mosaddegh H., Santosh M., “Geochemistry and petrogenesis of the Late Cretaceous Haji-Abad ophiolite Outer Zagros Ophiolite Belt, Iran implications for geodynamics of the Bitlis–Zagros suture zone”, Geological Journal 48(6), (2013) 579-602.
- [22] Hassanipak A. A., Ghazi A. M., “Petrology, geochemistry and tectonic setting of the Khoy ophiolite, Northwest Iran”, Journal of Asian Earth science, 18, (1999) 43-55.
- [23] Dilek Y., Delaloye M., “Structure of kizilda ophiolite, a slow – spread Cretaceous ridge segment north of the Arabian promontory”, Geology, 20, (1992) 19-22.
- [24] Sabzehei M., “Les Mélanges Ophiolitiques de la Région d’Esfandagheh (Iran Méridional). Étude Pétrologique et Structural. Interprétation dans le Cadre Iranien”, [Thèse Doctorat État]: Grenoble, Université Scientifi que et Médicale de Grenoble, (1974) 306 p.
- [25] Sabzehei M., “Upper Proterozoic–Lower Paleozoic ultramafic–mafic association of southeast Iran, Product of an ophiolitic magma of Komatiitic affinity”, International Ophiolite Symposium, Finland, Abstracts, (1998) 201.
- [26] Ghasemi H., Juteau T., Bellon H., Sabzehei M., Witechurch H., Ricou L. M., “The mafic–ultramafic complex of Sikhoran (central Iran): a polygenetic ophiolitic complex”, Geoscience, 334, (2002) 431–438.
- [27] Najafzadeh A. R., Ahmadipour H., “Using platinum-group elements and Au geochemistry to constrain the genesis of podiformchromitites and
- [8] Adamo I., Gatta G.D., Rotiroti N., Diella V., Pavese A., “Green andradite stones: Gemmological and mineralogical characterization”, European Journal of Mineralogy, 23 (1), (2011) 91–100, <http://dx.doi.org/10.1127/0935-1221/2011/0023-2079>.
- [9] Misiorowski E.B., Hays N.K., “Jewels of the Edwardians”, Gems & Gemology, 29(3), (1993) 152–171, <https://doi.org/10.5741/gems.29.3.152>.
- [10] Gill J.O., “Demantoid: The complete story”, Lapidary Journal, 32(7), (1978) 1542–1545.
- [11] Quinn E.P., Laurs B.M., “Gem News International: Demantoid from northern Pakistan”, Gems & Gemology, 41(2), (2005) 176–177.
- [12] Pavese A., Diella V., Pischedda V., Merli M., Bocchio R., Mezouar M., “Pressure-volume-temperature equation of state of andradite and grossular, by high-pressure and -temperature powder diffraction”, Physics and Chemistry of Minerals, 28(4), (2001) 242–248, <https://doi.org/10.1007/s002690000144>.
- [13] Milisenda C.C., Henn U., Henn J., “Demantoides aus Pakistan”, Gemmologie, Zeitschrift der Deutschen Gemmologischen Gesellschaft, 50 (1), (2001) 51–56.
- [14] Adamo I., Bocchio R., Diella V., Caucia F., Schmetzer K., “Demantoid from Balochistan, Pakistan: Gemmological and mineralogical characterization”, Journal of Gemmology, 34(5), (2015) 428–433, <https://doi.org/10.15506/JoG.2015.34.5.428>.
- [15] Krzemnicki M.S., “Diopside needles as inclusions in demantoid garnet from Russia: A Raman microspectrometric study”, Gems & Gemology, 35 (4), (1999) 192–195. <http://dx.doi.org/10.5741/gems.35.4.192>.
- [16] Palke A.C., Pardieu V., “Gem News International: Demantoid from Baluchistan Province in Pakistan”, Gems & Gemology, 50 (4), (2014). 302–303.
- [17] Douman M., Dirlam D., “Gem News International: Update on demantoid and cat’s-eye demantoid from Iran”, Gems & Gemology, 40 (1) (2004) 67–68.
- [18] Ahadnejad V., Krzemnicki M.S., Hirt A.M., “Demantoid from Kerman Province, South-east

- Dorothy Monstrance*", *Gems & Gemology*, 34 (2), (1998) 102–125.
- [42] Koivula J.I., Elen S., "Barite inclusions in fluorite", *Gems & Gemology*, 34 (4), (1998) 281–283.
- [43] Long D.A., "Raman Spectroscopy", McGraw-Hill International Book Co., New York (1977).
- [44] McMillan P.F., Hofmeister A.M., "Infrared and Raman spectroscopy. In F.C. Hawthorne, Ed., *Spectroscopic Methods in Mineralogy and Geology*, Mineralogical Society of America", *Reviews in Mineralogy*, Vol. 18, Chap. 4, (1988) 99–159.
- [45] Maestrati R., "Contribution à l'édification du catalogue Raman des gemmes", Unpublished diploma thesis, Diplôme d'Université de Gemmologie, Université de Nantes, France (1989).
- [46] Pinet M., Smith D.C., "Raman microspectrometry of garnets X3Y2Z3O12: I. The natural calcic series uvarovite-grossular-andradite", *Schweizerische Mineralogische Petrographische Mitteilungen*, 73, (1993) 21–40.
- [47] Kiefert L., Koivula J.I., "Idol's eyes: Chatoyant demantoid", AGTA GTC's Laboratory (2005) Update, May.
- [48] Barrois O., Giuliani G., Hafeznia Y., Zeenabad H.A., Rakotondrazafy A.F.M., Ohnenstetter D., Fallick A.E., Mathieu S. and Rouer O., "Caractéristiques minéralogique et chimique des grenats démantoides de Bagh Borj (Iran) et d'Antetazambato (Madagascar): conséquences géologiques. 2ème partie, études minéralogique et chimique", *Revue de Gemmologie AFG* 183: (2013) 10-15.
- [49] Milisenda C.C., Henn U., Henn J., "Demantoides aus Pakistan", *Gemmologie, Zeitschrift der Deutschen Gemmologischen Gesellschaft*, 50 (1), (2001) 51–56.
- [50] Mocquet B., Lulzac Y., Rondeau B., Fritsch E., Le Quéré J., Mohamady B., Crenn G., Lamiraud C., Scalie S., "Ambanja, premier gisement d'andradite démantoides à Madagascar", *Revue de Gemmologie AFG* (2009) 169: 4-8.
- [51] Hoskin P.W.O., Grapes R.H., Catchpole H., Klaudius J., "Horse-tail inclusions in demantoid from Val Malenco, Italy", *Journal of Gemmology*, 28 (6), (2003) 333–336.
- associated peridotites from the Soghan mafic-ultramafic complex, Kerman, southeastern Iran*", *Ore Geology. Review.*, 60, (2014) 60–75.
- [28] Jannessary M. R., Melcher F., Lodziak J., Meisel T. C., "Review of platinum-group element distribution and mineralogy in Chromitite ores from southern Iran", *Ore Geology, Reviews*, 48, (2012) 278–305.
- [29] Nasdala L., Smith D. C., Kaindl R., Ziemann M., "Raman spectroscopy: analytical perspectives in mineralogical research", In: Beran, A. & Libowitzky, E. (eds) *Spectroscopic Methods in Mineralogy*. Eötvös University Press, Budapest, European Mineralogical Union Notes in Mineralogy, 6, (2004) 281–343.
- [30] Frezzotti M. L., Tecce F., Casagli A., "Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis", *Journal of Geochemical Exploration*, 112, (2012) 1–20.
- [31] Raman C. V., "A new radiation", *Indian Journal of Physics*, 2, (1928) 387–398.
- [32] Landsberg G., Mandelstam L., *Naturwissenschaften*, 16 (1928) 557–558.
- [33] Delhay M., Dhamelin court P. J., "Raman Spectrosc", 3, (1975) 33–43.
- [34] Dhamelin court P., Bisson, "Microsc", *Acta* 79 (1977) 267–276.
- [35] Rosasco G.J., Etz E.S., Cassatt W.A., Appl., "Spectrosc", 29, (1975) 396–404.
- [36] Rosasco G.J., Roedder E., Simmons J.H., "Science", 190, (1975), 557–560.
- [37] Lasnier B, (2010). Pers. Comm.
- [38] Moore R.K., White B.W., Long T.V., "Vibrational spectra of the common silicates: I. The garnets", *American Mineralogist*, 56, (1971) 54–71.
- [39] Griffith W.P., "Advances in the Raman and infrared spectroscopy of minerals. In R.J.H. Clark and R.E. Hester, Eds", *Spectroscopy of Inorganic-Based Materials*, Wiley & Sons, New York, (1987) 119–186.
- [40] Delé-Dubois M.L., Dhamelin court P., Schubnel H.J., "Etude par spectrométrie Raman d'inclusions dans les diamants, saphirs et émeraudes", *Revue de Gemmologie, a.f.g.*, 63, (1980) 11–14, and Vol. 64, pp. 13–14.
- [41] Hänni H.A., Schubiger B., Kiefert L., Häberli S., "Raman investigations on two historical objects from Basel Cathedral: The Reliquary Cross and

- [55] Peighambari S., Uysal I., Stosch H. G., Ahmadipour H., Hadrian H., "Genesis and tectonic setting of ophiolitic chromitites from the Dehsheikh ultramafic complex (Kerman, southeastern Iran): Inferences from Platinum-group elements and chromite compositions", *Ore Geology Reviews*, 74, (2016) 39–51.
- [56] Zhou D., Cao S., Liu J., Li X., Dong Y., Neubauer F., Bai J., Li H., "Carbonation and serpentinization of diopside in the Altun Mountains, NW China", *Scientific Reports*, 12 (2022) Article number: 21361.
DOI: 10.1038/s41598-022-25612-5.
- [57] Frost B. R., Beard J. S., "On silica activity and serpentinization." *Journal of Petrology*, 48 (2007) 1351–1368.
DOI: 10.1093/petrology/egm021.
- [52] Koivula J.I., Elen S., "Barite inclusions in fluorite", *Gems & Gemology*, 34 (4), (1998) 281–283.
- [53] Pour A.B., Hashim M., "a. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran", *Journal of Asian Earth Sciences* 42, (2011) 1309-23.
- [54] Pour A.B., Hashim M., "b. Spectral transformation of ASTER data and the discrimination of hydrothermal alteration minerals in a semi-arid region", *SE.*, (2011).