پتـــــرولوژی، سال پنجم، شماره بیستم، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۷۱-۹۰
تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۴/۱۶

سرپانتینی شدن پریدوتیت‌های پیرانشهر، شمال‌غرب ایران: مطالعه پلی‌مورف‌های سرپانتین و تحولات دگرگونی متاپریدوتیت‌ها

فرزانه ولی‌نسب زرنق، رباب حاجی علی اوغلی * و محسن مؤذن
گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده
مجموعه افیولیتی پیرانشهر در شمال‌غرب شهرستان پیرانشهر در استان آذربایجان غربی واقع شده‌است. سنگ‌های متاپریدوتیت در این منطقه بر اساس مطالعات پتروگرافی، کانی‌شناسی و مشاهدات بافتی، در دو گروه پریدوتیت های سرپانتینی‌شده و سرپانتینیت‌ها دسته‌بندی شده‌اند. انواع سرپانتینیت‌ها بر اساس نوع پلی‌مورف‌های سرپانتین و بافت در سه زیر گروه دسته‌بندی شده‌اند: الف) سرپانتینیت‌های حاصل هیدراسیون که بیش‌تر حاوی پلی‌مورف‌های دما پایین سرپانتین (کریزوتیل و لیزاردیت) با بافت های سودومورفی غالب غربالی و بستایت است؛ ب) سرپانتینیت های دگرگونی دارای آنتی‌گوریت (پلی‌مورف دما بالای سرپانتین) با بافت غالب به هم نفوذ کرده (interpenetrative) که در شرایط درجه دگرگونی به نسبت بالاتر تشکیل شده‌اند و ج) سرپانتینیت‌های لیستونیتی که دارای سرپانتین و کلریت به همراه مقادیر بالایی از کانی‌های کربناته با بافت برشی است. به منظور شناسایی انواع پلی‌مورف‌های سرپانتین در سنگ های مورد مطالعه از طیف‌سنجی رامان و داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی استفاده شده است. تشکیل پلی‌مورف‌های دما پایین سرپانتین در سرپانتینیت‌های حاصل هیدراسیون به احتمال زیاد مرتبط با دگرسانی درجای پوسته اقیانوسی بوده است. در صورتی که ظهور آنتی‌گوریت (پلی‌مورف دما بالای سرپانتین) در سرپانتینیت‌ها را می‌توان به دگرگونی‌های ناحیه‌ای مرتبط با فرورانش پوسته اقیانوسی و بسته شدن آن نسبت داد. آمفیبول از نوع ترمولیت، کلریت با ترکیب پیکنوکلر و کلینوکلر و اسپینل غنی از آهن از کانی‌های مهم دگرگونی در سرپانتینیت های دگرگون شده دارای آنتی‌گوریت است. دما و فشار دگرگونی تشکیل این سنگ‌ها بر اساس واکنش‌های تعادلی ترموکالک به ترتیب ۵۵۰ درجه سانتیگراد و فشار ۷ کیلوبار محاسبه شد. پروتولیت متاپریدوتیت‌های پیرانشهر بر اساس ترکیب نورماتیو اولیوین، اورتوپیروکسن و کلینوپیروکسن، هارزبورژیت و کمتر لرزولیت تعیین شد. مقادیر بالای MgO و مقادیر به نسبت پایین CaO و Al_2O_3 در ترکیب سنگ کل سنگ‌های مورد مطالعه ویژگی افیولیتی آنها را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن موقعیت مکانی افیولیت‌های پیرانشهر در انتهایی‌ترین بخش شمال‌غربی کمربند افیولیتی زاگرس شاید به توان تشکیل سرپانتینیت‌های حاصل هیدراسیون و سرپانتینیت‌های آنتی‌گوریت‌دار را به ترتیب مرتبط با دگرسانی استاتیک کف اقیانوس و دگرگونی‌های دینامیکی مرتبط با فرورانش و بسته شدن اقیانوس نئوتتیس در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: رامان اسپکتروسکوپی، شیمی‌کانی، پلی‌مورف‌های سرپانتین، متاپریدوتیت، پیرانشهر، سنندج-سیرجان

* hajialioghli@tabrizu.ac.ir

مقدمه

فرآینـــد ســـرپانتینی شـــدن حاصـــل تجزیـــه شـیمیایی و فیزیکـی سـنگ‌هـا بـوده کـه بـه دلیـل هیدراسـیون سـنگ‌هـای اولترامافیـک یـا مافیـک در نتیجـه واکـنش بـا سـیالات بـا منشـأهای مختلـف در منـاطق مختلـف تکتـونیکی رخ مـی دهـد. Coleman (۱۹۷۱) به لحاظ ویژگـی‌هـای کـانی‌شناسـی، بـافتی و پتروژنـز، دو نـوع اصـلی سـرپانتینیت‌هـا را تشـخیص داده اســـت: الـــف) ســـرپانتینیت‌هـــای حاصـــل هیدراسـیون کـه فـراوان‌تـرین نـوع سـرپانتینیت‌هـا هسـتند و توسـط هیدراسـیون پریـدوتیت‌هـا تشـکیل مــی‌شــود. ایــن نــوع ســرپانتینیت‌هــا اغلــب بافــت سـودومورفی دارد و بـه لحـاظ کـانی‌شناسـی بیشـتر از لیزاردیـت و بـه مقـدار کمتـری از کریزوتیـل تشـکیل شـــده‌انـــد. ســـرپانتینیت هـــای حاصـــل هیدراســـیون توســـط بافـــت مشـــخص ســـودومورفی خـــود کـــه نشــــان‌دهنــــده جانشــــینی پســــرونده اولیــــوین، اورتوپیروکســـن، کلینوپیروکســـن و نیـــز بـــا دارا بـــودن مقـادیر مـودال کمتـر ترمولیـت، تالـک و آنتوفیلیـت از گـروه بعـدی تشـخیص داده مـی‌شـود و ب) دومـین نـوع سـرپانتینیت‌هـا نـوع آنتـی‌گوریـت سـرپانتینیت است که توسط تبلـور مجـدد سـنگ‌هـای سـرپانتینیت ســـودومورفی طـــی دگرگـــونی پیشـــرونده تشـــکیل مـــــی‌شـــــود (Wicks and Coleman, 1971؛ Whittaker, 1977). ایــــن گــــروه بــــه لحــــاظ کـانی‌شناسـی بیشـتر از آنتـی‌گوریـت‌هـای صـفحه‌ای و بـه مقـدار کمتـری از لیزاردیـت و کریزوتیـل تشـکیل شـده‌انـد. اگـر دمـا طـی دگرگـونی پیشـرونده بـاز هـم افـزایش یابـد ایـن سـرپانتینیت‌هـا بـه سـنگ‌هـای آنتـی‌گوریـت-فورسـتریت و بـا افـزایش بیشـتر دمـا تـا حدی که منجـر بـه از دسـت دادن کامـل آب شـود بـه پریـدوتیت‌هـای ثانویـه تبـدیل مـی‌شـود (Dungan, 1979).

درک فرآینـــد ســـرپانتینی شـــدن بـــه دلایلـــی از جملـه: تعیـین ترکیـب سـنگ مـادر یـا معـادل سـنگ بـدون آب، تعیـین وضـعیت دمـا و فشـاری کـه در آن هیدراســـیون رخ داده، تعیـــین چگـــونگی فرآینـــد سرپانتینی شدن در پوسـته یـا گوشـته، ارزیـابی منشـأ احتمالی و ترکیـب فازهـای سـیال طـی هیدراسـیون و بـه دسـت آوردن اطلاعـاتی از ترکیـب سـیالات بعـد از آلتراسیون مهم است.

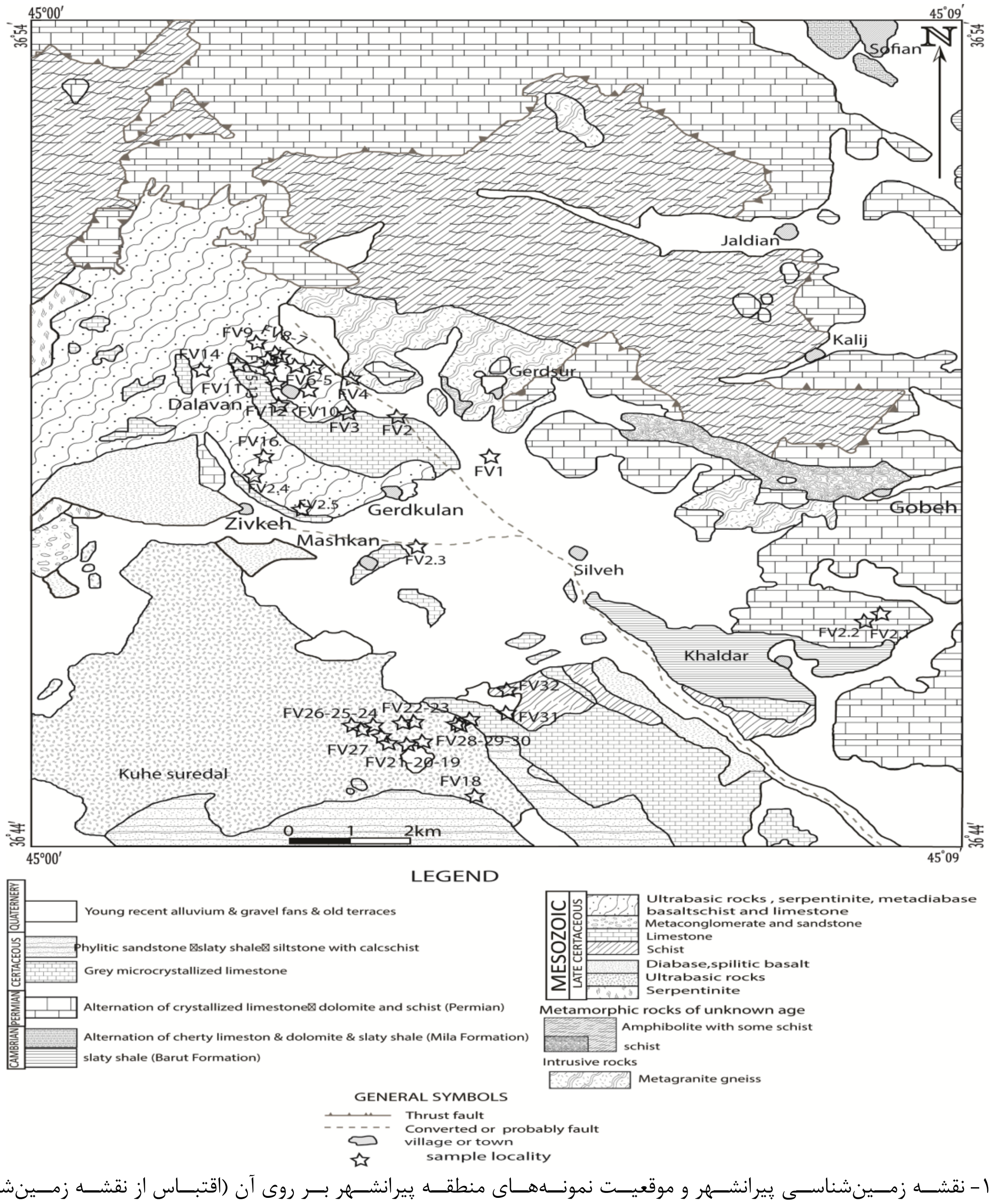
تعیـین دقیـق انـواع پلـی‌مـورف‌هـای سـرپانتین و بررسـی‌هـای بـافتی آنهـا در مجموعـه‌هـای افیـولیتی مـی‌توانـد اطلاعـات مهمـی از تشـکیل سـرپانتینیت‌هـا در پشـــته‌هـــای میـــان اقیانوســـی، فـــرورانش پوســـته اقیانوســـی و ارتبـــاط آن بـــا ســـیالات آزاد شـــده از پوسته اقیانوسـی فرورونـده و بـالاآمـدگی سـنگ‌هـا بـه دنبال بسـته شـدن اقیـانوس داده کـه در نهایـت نقـش مهمـــی را در تفســـیر تاریخچـــه حـــوادث تکتـــونیکی منطقـــه خواهـــد داشـــت. تجزیـــه بـــا روش رامـــان اسپکتروسـکوپی از مهـم‌تـرین روش‌هـای تشـخیص پلـی‌مـورف‌هـای سـرپانتین اسـت. در ایـن پـژوهش، انواع پلی مـورف هـای سـرپانتین در سـرپانتینیت‌هـا بـر اســاس مطالعــات رامــان اسپکتروســکوپی و داده‌هــای تجزیـه ریزکـاو الکترونـی بـه طـور دقیـق تعیـین شـده اسـت. همچنـین، ویژگـی‌هـای کـانی‌شناسـی و بـافتی انـواع سـرپانتینیت‌هـا بررسـی شـده و تحـرک عناصـر طی فرآیند سـرپانتینی شـدن سـنگ‌هـای پریـدوتیتی، شـــرایط ترمودینـــامیکی دمـــا و فشـــار دگرســـانی و دگرگونی بعدی آنها مشخص شده است.

زمین‌شناسی منطقه

مجموعـه افیـولیتی پیرانشـهر بـا طـول و عـرض جغرافیـایی '۳۶°۴۴ تـا '۳۶°۵۴ شـرقی و '۴۵°۰۰ تـا '۴۵°۱۰ شـمالی در مـرز غربـی ایـران بـا عـراق در شـــمال‌غـــرب شهرســـتان پیرانشـــهر در اســـتان

آذربایجان غربی واقع شده است. از دیدگاه تقسیمات واحدهای ساختمانی-رسوبی ایران، منطقه مورد مطالعه طبق نظر Nabavi (۱۹۷۶) و Gilg و همکاران (۲۰۰۶) بخشی از کمربند دگرگونی پهنه سنندج-سیرجان دانسته شده است. Khodabandeh (۲۰۰۴) نیز منطقه مورد مطالعه را به لحاظ لیتولوژی مشابه با پهنه Outer Taurus ترکیه در نظر گرفته است که شماری از سازنده‌های منطقه با پهنه یاد شده در ترکیه قابل مقایسه هستند.

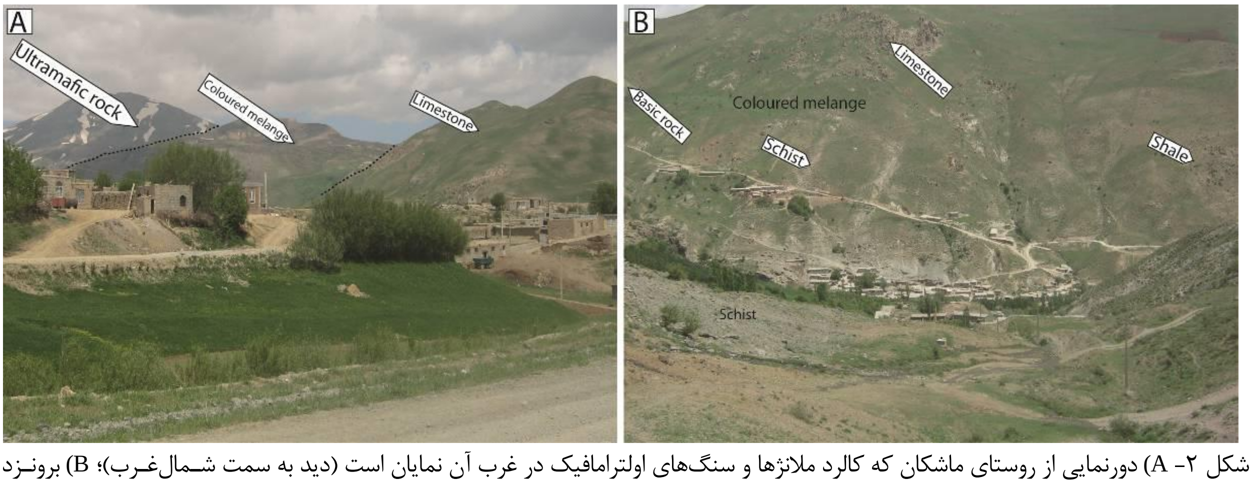
در این منطقه سنگ‌های دگرگونی و رسوبی در گستره‌ای بسیار پهناور رخنمون دارد (شکل ۱).



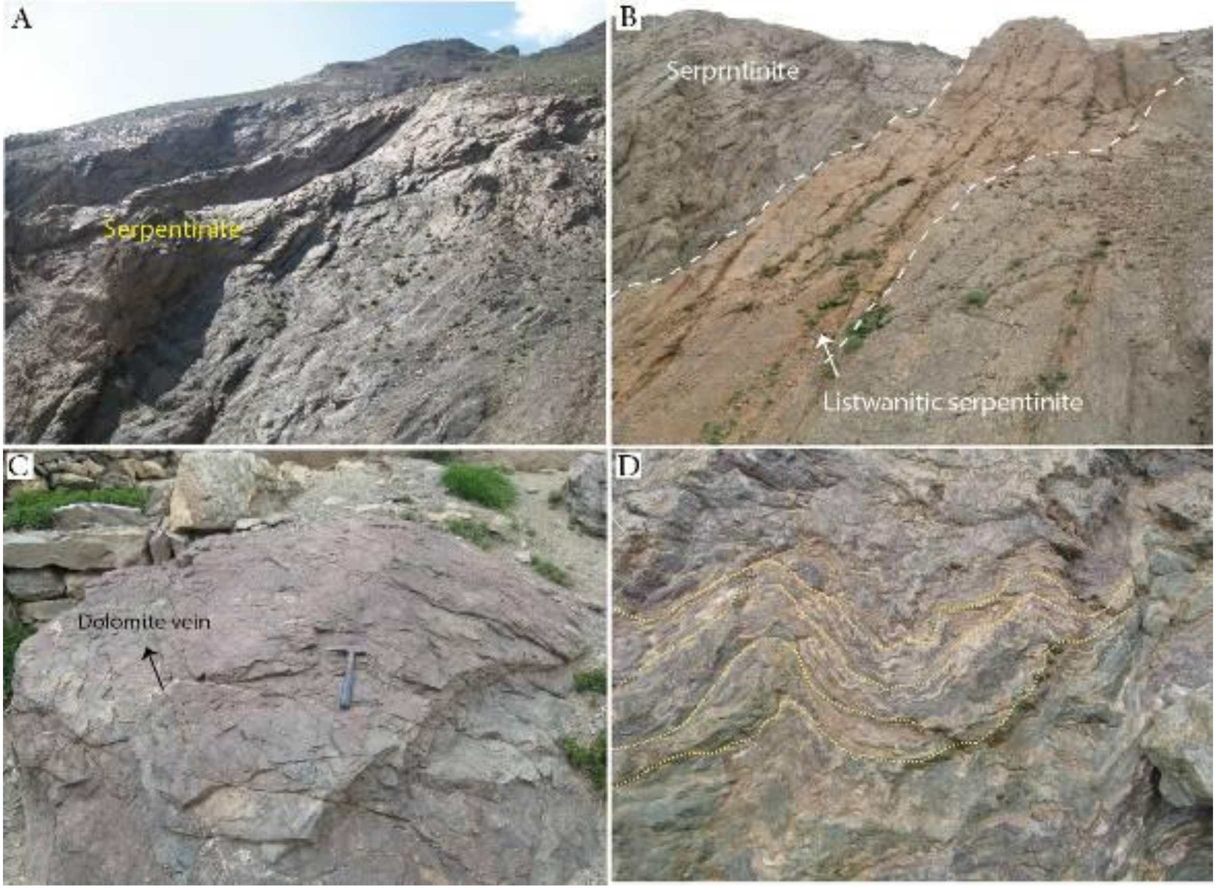
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی پیرانشهر و موقعیت نمونه‌های منطقه پیرانشهر بر روی آن (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ نقده (Khodabandeh, 2004).

سـنگ‌هـای دگرگـونی ناحیـه‌ای بـا ترکیـب آمفیبولیـت و بـه مقـدار کمتـری شیسـت و مرمـر در منطقه رخنمـون دارد. نهشـته‌هـای کربناتـه پـرمین بـا مـرز گسـله بـر روی ایـن مجموعـه واقـع شـده اسـت (Khodabandeh, 2004). رخنمـون‌هـای پراکنـده مشابه این سنگ‌هـای دگرگـون در شـمال منطقـه نیـز دیده می شـود کـه ادامـه ایـن دگرگـونی‌هـا بـه سـمت شـمال تـا اشـنویه اسـت. سـن ایـن دگرگـونی‌هـا مشـخص نیسـت (Khodabandeh, 2004). ملانـژ افیـولیتی کرتاسـه بخشـی بـه نسـبت گسـترده را در غرب منطقه تشـکیل مـی‌دهـد. شـکل ۲-A دورنمـایی از سـنگ‌هـای کـالرد ملانـژ و برونـزد سـنگ‌هـای اولترامافیـک در شـمال‌غـرب روسـتای ماشـکان را نشـان مـی‌دهـد. سـنگ‌هـای تشـکیل‌دهنـده ایـن مجموعـه دربرگیرنـده انـواع سـنگ‌هـای اولترابازیـک، بـیش‌تـر پریـدوتیت، سـرپانتینیت، دیابـاز، بازالـت و سـنگ‌هـای دگرگونـه شیسـت بـه همـراه سـنگ‌هـای رسوبی نـواحی ژرف، ماننـد: چـرت‌هـای رادیـولاریتی و آهک‌های پلاژیک اسـت. بـا توجـه بـه تکتـونیزه بـودن منطقه مرز بـین واحـدها گسـلی اسـت. رخنمـون ایـن سـنگ‌هـا همچنـین، در غـرب روسـتای زیوکـه نیـز مشـاهده مـی‌شـود کـه ادامـه آن بـه سـمت غـرب بـه ارتفاعـات مـرزی بـین ایـران و عـراق مـی‌رسـد (شـکل ۲-B).

رخنمـون اصـلی سـنگ‌هـای متاپریـدوتیت در ارتفاعـات و در مـرز بـین ایـران و عـراق جـای گرفتـه اسـت (شـکل ۳- A و B). پریـدوتیت‌هـای سـرپانتینی شـده بـه طـور کامـل سـرپانتینی نشـده‌انـد و در آنهـا بقایـایی از کـانی‌هـای اولیـوین و پیروکسـن بـا چشـم غیـر مسـلح قابـل تشـخیص اسـت. ایـن سـنگ‌هـا اصـلی‌تـرین انـواع سـنگ‌هـای اولترامافیـک دگرگـون شـده در منطقـه مـورد مطالعـه اسـت. سـرپانتینیت‌هـا به طور کامـل سـرپانتینی شـده‌انـد. سـرپانتینیت‌هـا در محل پهنه‌هـای برشـی و شکسـتگی‌هـا دگرسـان شـده و سـرپانتینیت‌هـای لیسـتونیتی در امتـداد ایـن شکسـتگی‌هـا تشـکیل شـده اسـت (شـکل ۳-B). سنگ‌هـای سـرپانتینیت دارای تنـوع رنگـی از قهـوه‌ای تیره تا قهـوه‌ای کـم‌رنـگ، سـبز تیـره و سـبز کـم‌رنـگ اسـت و در برخـی مـوارد رگچـه‌هـای آهکـی در داخـل آنهـا مشـاهده مـی‌شـود (شـکل ۳-C). سـاختار سرپانتینیت‌ها بـه طـور شـاخص از نـوع تـوده‌ای اسـت. در تعـدادی از نمونـه‌هـا مرحلـه‌هـای دگرشـکلی در زمینـه سـرپانتینیت کـه شـاید در حـین جـایگیری اعمال شده است، بـه خـوبی مشـهود اسـت. بـه طـوری که ایـن سـنگ‌هـا حالـت تـورق و گـاه چـین‌خـوردگی نیز نشان می‌دهد (شکل ۳-D).



شکل ۲- A) دورنمایی از روستای ماشکان که کالرد ملانژها و سنگ‌های اولترامافیک در غرب آن نمایان است (دید به سمت شـمال‌غـرب)؛ B) برونـزد کالرد ملانژها در غرب روستای زیوکه. دره بزرگ در این عکس محل گسلی است که سنگ‌های دو طرف را از هم جدا کرده است (دید به سمت غرب).



شکل ۳- A) برونزد سرپانتینیت‌ها در غرب روستای دلاوان؛ B) سرپانتینیت لیستونیتی شده به موازات گسل در داخل سرپانتینیت؛ C) رگچه‌های کربنات در داخل سرپانتینیت‌های سبز تا قهوه‌ای؛ D) سرپانتینیت‌های چین‌خورده و متورق در اطراف روستای دلاوان.

روش انجام پژوهش

انواع کانی‌های سرپانتین در پریدوتیت‌های سرپانتینی شده و سرپانتینیت‌های پیرانشهر در تعداد دو نمونه از سنگ‌ها با روش طیف‌سنجی Raman توسط دستگاه (HORIBA Jobin Yvon, LabRAM HR800)، لیزر با ویژگی‌های 532 nm و Nd:YAG، میکروسکوپ نوری (Olympus, BX41) و طیف سنج چند رنگ با دتکتور 256×1024 پیکسل از نوع Si-based CCD (charge-coupled device) در دانشگاه کانازاوا ژاپن تجزیه شد. همچنین، برای تعیین ترکیب شیمیایی انواع پلی‌مورف‌های سرپانتین و مجموعه کانی‌های دگرگونی، نمونه‌ها با روش تجزیه ریزکاو الکترونی در دانشگاه کانازاوا ژاپن مورد آنالیز قرار گرفت. شرایط تجزیه accelerating voltage برابر ۱۵ کیلو ولت و beam current برابر با ۲۰ نانو آنگستروم بوده است. تجزیه XRF عناصر اصلی (در شرکت کانساران بینالود) در تعداد چهار نمونه از پریدوتیت‌های سرپانتینی شده و سرپانتینیت‌های پیرانشهر به منظور تعیین ترکیب پروتولیت سنگ‌ها انجام شد.

مروری بر تفاوت‌های ساختاری و شیمی‌کانی پلی‌مورف‌های سرپانتین

تنوع ساختاری کانی‌های مختلف سرپانتین در نتیجه عدم مطابقت بین ابعاد جانبی ورقه تتراهدرال سیلیسیم‌دار و ورقه اکتاهدرال منیزیم‌دار به علت تفاوت در اندازه ورقه‌ها (ورقه تتراهدرال کوچک‌تر از

ورقـه اکتاهـدرال) اسـت (Coleman, 1971). ایـن عـدم تطابق بین ورقه ها منجر بـه ایجـاد ترکیـب هـای مختلـف سـاختاری و تغییراتـی در ابعـاد جـانبی ورقـه‌هـا توسـط جانشـینی کـاتیون‌هـای مختلـف بـه جـای منیـزیم و سیلیسـیم مـی‌شـود (Coleman, 1971). کریزوتیـل کـه جانشـینی جزیـی را در سـایت‌هـای اکتاهـدرال و تتراهدرال مـی پـذیرد بـا ایجـاد یـک سـاختار اسـتوانه ای بر عدم مطابقت بـین ورقـه هـا غلبـه مـی کنـد. لیزاردیـت سـاختار صـفحه‌ای دارد کـه نیازمنـد کشـش در خـور توجـه در ورقـه تتراهـدرال و فشـرده سـازی ورقـه اکتاهـدرال اسـت (Dungan, 1979). جانشـینی کـاتیون‌هـایی ماننـد Cr^{3+} و Fe^{3+} در سـایت تتراهـدرال و Al در سـایت اکتاهـدرال منجـر بـه تغییـر در ابعـاد ورقه ها شده و با چرخش زوایـا ی بانـدی بـر عـدم تطـابق غلبـه مـی‌کنـد. کریزوتیـل سـاختار اسـتوانه‌ای دارد کـه موجـب مـی‌شـود حالـت فیبـری نشـان دهـد. لیزاردیـت ظرفیت بیش‌تـری بـرای جانشـینی نسـبت بـه کریزوتیـل دارد (Chernostey, 1975). بـا وجـود ایـن ظرفیـت، فرمـول Mg-end member بـرای هـر دو گونـه پلـی مـورف سـرپانتین بـه صـورت $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$ اسـت (Dungan, 1979).

فرمـول سـاختاری آنتـی‌گوریـت انـدکی متفـاوت از لیزاردیـت و کریزوتیـل اسـت (Kunze, 1956, 1958, 1961). آنتـی‌گوریـت سـاختار مـوجی متنـاوب دارد. ایـن سـاختار موجـب مـی‌شـود آنتـی‌گوریـت میـزان Mg^{2+} و OH^- کم‌تری نسبت بـه سـرپانتین ایـده‌آل داشـته باشـد (Whittaker and Wicks, 1970). فرمـول Mg-end member بـــرای آنتـــی‌گوریـــت بـــه صـــورت $Mg_{5.625}Si_4O_{10}(OH)_{7.359}$ است (Dungan, 1979).

طیف‌سنجی رامـان پلـی مـورف هـای سـرپانتین در متاپریـدوتیت‌هـای پیرانشـهر: تشـخیص دقیـق انواع پلـی‌مـورف‌هـای سـرپانتین شـامل: آنتـی‌گوریـت، کریزوتیـل و لیزاردیـت اغلـب بـرخلاف دارا بـودن ترکیب شـیمیایی بـه نسـبت سـاده بـا فرمـول عمـومی $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$، بـه نسـبت مشـکل اسـت (Groppo *et al.*, 2006). انـدازه بسـیار ریـز بـا ویژگـی‌هـای نـوری بسـیار مشـابه از دلایـل مهـم در عدم تشخیص دقیـق انـواع پلـی‌مـورف هـای سـرپانتین بـر اسـاس ویژگـی‌هـای نـوری اسـت (Groppo *et al.*, 2006). پلـی‌مـورف‌هـای سـرپانتین دارای ریزسـاختارهای (Microstructures) متفـاوتی هسـتند (Wicks and Whittaker, 1975, 1977؛ Wicks *et al.*, 1977؛ Wicks and Plant, 1979؛ Wicks and O’Hanley, 1988) کـه هـر کـدام مـنعکس کننـده شـرایط مختلـف P-T تشـکیل و سیال سازنده خود است (Groppo *et al.*, 2006).

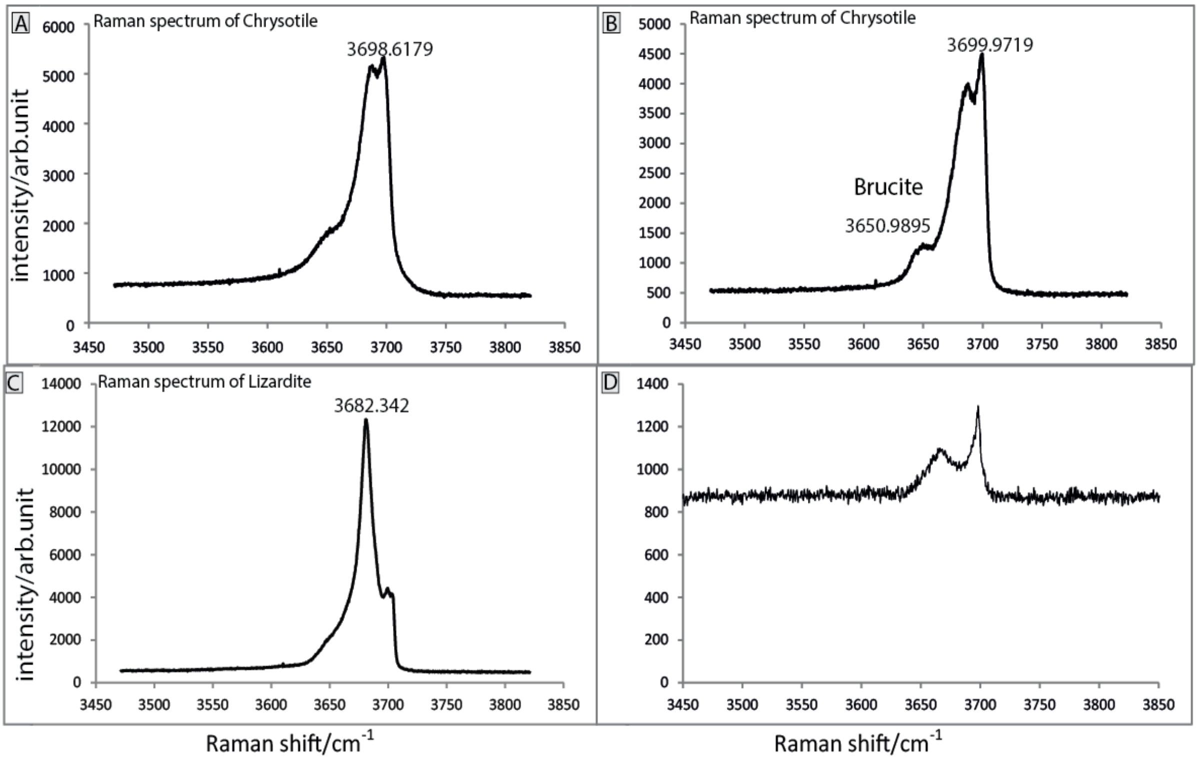
به منظور شناسـایی انـواع کـانی هـای سـرپانتین در متاپریـدوتیت‌هـای پیرانشـهر، تعـداد دو نمونـه از سنگ هایی که از آنها مقطـع نـازک تهیـه شـده بـود بـا اسـتفاده از طیـف‌سـنجی رامـان بررسـی شـد. نتـایج حاصل از طیف‌سنجی رامـان نشـان داد کـه کـانی‌هـای سـرپانتین در نمونـه FV27 کریزوتیـل (شـکل ۴-A)، کریزوتیـل و بروسـیت (شـکل ۴-B) و لیزاردیـت (شـکل ۴-C) و در نمونـه FV24 آنتـی‌گوریـت (شـکل ۴-D) است.

پتروگرافی متاپریدوتیت‌ها

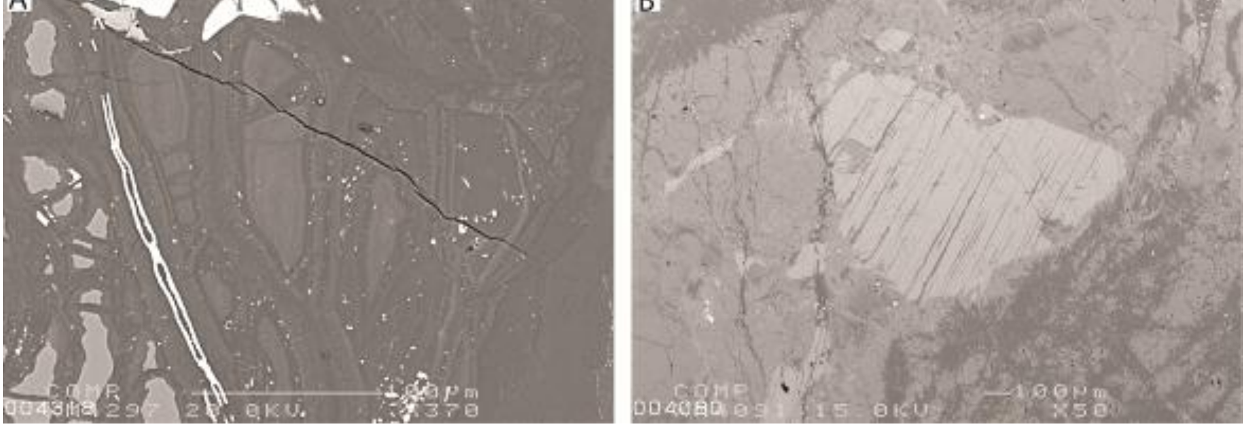
در ایـن قسـمت ویژگـی‌هـای پتروگرافـی پریـدوتیت‌هـای سـرپانتینی شـده و سـرپانتینیت‌هـای پیرانشـهر مـورد بررسـی قـرار مـی‌گیـرد (علایـم اختصاری کانی‌ها از Kretz (۱۹۸۳) است).

پریـدوتیت‌هـای سـرپانتینی شـده: ایـن سـنگ‌هـا حاصـل سـرپانتینی‌شـدن بخشـی پریـدوتیت‌هـا اسـت. بافـت سـودومورفی غربـالی (مـش) و بسـتایت از بافت‌هـای اصلی ایـن سـنگ‌هـا هسـتند (شـکل ۵-A و B). کـانی‌هـای بـاقی‌مانـده اولیـه در پریـدوتیت‌هـای سـرپانتینی شـده عبارتنـد از: اولیـوین، اسـپینل، اورتوپیروکسن و بـه مقـدار کـم‌تـر کلینوپیروکسـن. بافت

اولیه اولیوین‌ها، دانه‌ای بوده و به شدت شکسته و خرد شده‌اند (شکل ۶-A). بقایای اولیوین به‌صورت کانی‌های به نسبت دانه‌ریز در هسته بافت غربالی مشخص است. کلینوپیروکسن بی‌شکل بوده و بیشتر به ترمولیت/اکتینولیت تبدیل شده و بقایای آن در مقاطع خیلی کم دیده می‌شود. مجموعه کانی‌های دگرگونی در این سنگ‌ها شامل: Lz+Ctl+Chl+Dol/Mgs است. در برخی از نمونه‌ها کانی‌های آنتی‌گوریت، کلینوکلر و ترمولیت در مقادیر کمتر در نتیجه مصرف لیزاردیت، تالک و کریزوتیل طی فرآیندهای دگرگونی پیش‌رونده در زمینه سنگ ظاهر شده است.



شکل ۴- طیف‌سنجی Raman پلی‌مورف‌های سرپانتین در متاپریدوتیت‌های پیرانشهر. A) کریزوتیل؛ B) کریزوتیل و بروسیت؛ C) لیزاردیت و D) آنتی گوریت.



شکل ۵- تصاویر SEM از بافت‌های A) غربالی و B) بستایت در پریدوتیت‌های سرپانتینی شده پیرانشهر

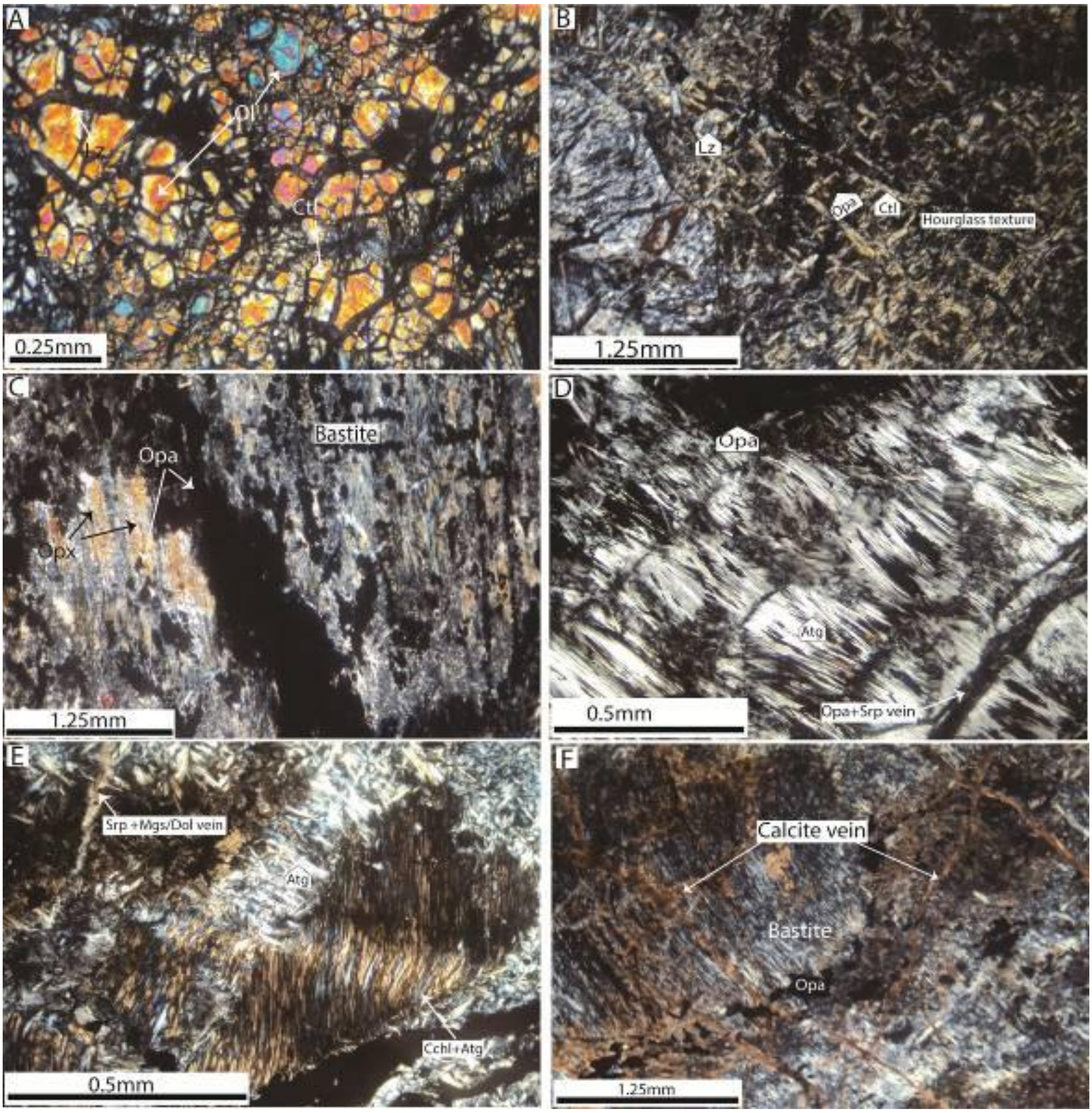
ســرپانتینیت‌هــا: ســنگ‌هــای ســرپانتینیت حاصــل ســرپانتینی شــدن کامــل پریــدوتیت‌هــا بــوده و بقایــای کانی‌هــای اولیــه بــه نــدرت در ایــن ســنگ‌هــا مشــاهده مــی‌شــود. ایــن ســنگ‌هــا بــر حســب نــوع پلــی‌مــورف ســرپانتین و ویژگــی‌هــای بــافتی در ســه زیــر گــروه دسته‌بندی شده‌اند:

الف) سرپانتینیت هـای حاصـل هیدراسـیون: ایـن سـرپانتینیت‌هـا حاصـل آلتراسـیون اولیـه سـنگ‌هـای اولترامافیـک اسـت. بافـت غالـب در آنهـا بافـت‌هـای شیشـه سـاعتی و بسـتایت اسـت (شـکل ۶-B و C). کـانی‌هـای تشـکیل‌دهنـده ایـن سـنگ‌هـا شـامل: Lz+Ctl+Brc+Mag/Dol اسـت. بروسـیت بسـیار دانه‌ریـز بـوده و توسـط تجزیـه رامـان اسپکتروسـکوپی تشخیص داده شده است. در ایـن سـنگ‌هـا لیزاردیـت بـیش‌تـرین فراوانـی را نسـبت بـه کریزوتیـل دارد. آنتی گوریت (پلی‌مـورف دمـا بـالای سـرپانتین) در ایـن نمونه ها حضور نـدارد. لیزاردیـت بـا رنـگ اینترفـرانس ضـعیف بـه‌صـورت بـی‌شـکل و دانـه‌ریـز در حاشـیه و گاهی در مرکز بافـت غربـالی و هـم چنـین، بـه صـورت دانـه‌ریـز در زمینـه سـنگ نیـز مشـخص اسـت. کریزوتیـل، دیگـر پلـی‌مـورف سـرپانتین بـا شـکل رشـته‌ای و فیبـری خـود در شکسـتگی‌هـا و نیـز حاشـیه بافـت شیشـه سـاعتی بـه همـراه بروسـیت مشـاهده مـی‌شـود. تجزیـه بلـورهـای اورتوپیروکسـن، معمولاً از اطـراف یـا در طـول شکسـتگی‌هـای موجـود شـروع شـده و بسـتایت بـه‌صـورت رشـته‌هـایی از مـرز شکسـتگی بـه سـمت مرکـز اورتوپیروکسـن در حـال رشـد اسـت. گـاهی در هنگـام بسـتایتی شـدن اورتوپیروکسـن، آهـن اضـافی حاصـل از بسـتایتی شـدن در قالـب کـانی‌هـای دانـه‌ریـزی در حاشـیه اورتوپیروکسن قـرار گرفتـه و سـبب تشـکیل یـک لایـه نـازک اکسـید آهـن در اطـراف اورتوپیروکسـن شـده و شکل اولیه آن را کاملاً حفظ می‌کند (شکل ۶-C).

ب) ســرپانتینیت‌هــای دارای آنتــی‌گوریــت: در بررسـی‌هـای میکروسـکوپی، ایـن نمونـه‌هـا نیـز کـاملاً سـرپانتینی‌شـده و آثـار کـانی‌هـای اولیـه در آنهـا بـه سـختی قابـل مشـاهده بـوده یـا اصـلاً مشـاهده نمی‌شود. شـدت سـرپانتینی شـدن در ایـن سـنگ‌هـا بـه حـدی اسـت کـه عـلاوه بـر ایـن کـه اولیـوین و اورتوپیروکسـن کـاملاً از بـین رفتـه، بافـت‌هـای سـودومورفی حاصـل از دگرسـانی اولیـوین یـا حتـی پیروکسـن نیـز حفـظ نشـده اسـت. بافـت‌هـای سودومورفی بـه طـور کامـل توسـط کـانی‌هـای حاصـل از دگرگـونی پـیش‌رونـده جانشـین شـده و آنتـی‌گوریـت، پلـی‌مـورف غالـب سـرپانتین در ایـن سـنگ‌هـا اسـت (شـکل ۶-D). مجموعـه کـانی‌هـای دگرگـونی ایـن سـنگ‌هـا عبارتنـد از: Atg+Spl±Ctl±Lz±Cchl±Mt. بافـت عمـومی سـنگ، در هـم نفـوذ کـرده (interpenetrative) اسـت کـه در آن آنتـی‌گوریـت بـه‌صـورت تیغـه‌ای در زمینـه سنگ مشاهده می‌شـود. کلینـوکلر بـه صـورت صـفحات کشیده با رنگ تـداخلی خاکسـتری تـا سـفید در مـتن سنگ مشخص بـوده و کلیـواژ خمیـده نشـان مـی‌دهـد (شکل ۶-E).

ج) ســرپانتینیت‌هــای لیســتونیتی: سـرپانتینیت‌هـای لیسـتونیتی در بررسـی‌هـای صـحرایی در راسـتای پهنـه‌هـای برشـی و منـاطق گسـل خـورده دیـده مـی‌شـود. سـرپانتینیت‌هـا نسـبت بـه بافرهـای CO_2 بسیار حسـاس اسـت. بـرای تبـدیل مجموعـه‌هـای سـرپانتین بـه مجموعـه‌هـای حـاوی کربناتـه، وجـود مقـدار کمـی CO_2 در سـیال کـافی اسـت (Bucher and Frey, 1994). جریـان سـیال غنـی از Ca^{2+} و CO_2 در طـول شکسـتگی‌هـای سـرپانتینیت باعـث تشکیل سـرپانتینیت‌هـای لیسـتونیتی شـده اسـت. ایـن سـنگ‌هـا محصـول دگرسـانی گرمـابی از نـوع کربنـاتی شـدن هسـتند. مجموعـه کـانی‌هـای ایـن سـنگ‌هـا عبارتنـد از Cc+Srp±Tr/Act±Chl±Opaque. کـانی کلسـیت (در حـدود ۳۰ درصـد) زمینـه سـنگ‌هـا را

تشکیل می‌دهد. این کربنات ها در زمینه اغلب بسیار ریزدانه هستند. کلریت به رنگ سبز در زمینه دانه‌ریز تشکیل شده است. کانی‌های کربنات به صورت ثانویه جایگزین هسته بسیاری از بلورهای سرپانتین در بافت غربالی شده است. در این سنگ رگه‌های پر شده زیادی از کانی‌های کربناته نیز مشاهده می‌شود. رگه های کربناته معمولاً همدیگر را قطع کرده‌اند. سودومورف‌های پیروکسن نیز توسط رگه‌های ثانویه کربناته قطع شده و کانی‌های کربناته بر روی آن‌ها رشد کرده‌اند (شکل ۶-F).



شکل ۶- پتروگرافی متاپریدوتیت‌های پیرانشهر. A) اولیوین‌های با بافت دانه‌ای و شکسته شده در پریدوتیت سرپانتینی شده؛ B) بافت شیشه ساعتی در سرپانتینیت حاصل آلتراسیون؛ C) بافت بستایت در سرپانتینیت حاصل آلتراسیون و تجمع کانی‌های اپاک در اطراف اورتوپیروکسن؛ D) آنتی‌گوریت تیغه‌ای در سرپانتینیت دگرگون شده؛ E) کلینوکلر خمیده در سرپانتینیت دارای آنتی‌گوریت، F) رشد رگه‌های کربناته بر روی بافت بستایت در سرپانتینیت لیستونیتی شده. تمامی تصاویر در حالت XPL است.

شیمی کانی‌ها

ســـــــرپانتین: جـــدول ۱ ترکیـــب شـــیمی پلـی‌مـورف‌هـای سـرپانتین (کریزوتیـل، لیزاردیـت و آنتـی‌گوریـت) در متاپریـدوتیت‌هـای پیرانشـهر را نشـان مـی‌دهـد. تغییـرات ترکیبـی در فرمـول کـانی‌شناسـی سـرپانتین در سـنگ‌هـای مـورد مطالعـه (پـنج کـاتیون به ازای هفت اکسیژن) به این صورت است:

$$(Mg_{2.18\text{-}3.00}Fe_{0.00\text{-}0.22}Al_{0.00\text{-}0.48}Cr_{0.00\text{-}0.07})_3$$
$$(Si_{1.73\text{-}2.00}\,Al_{0.00\text{-}0.27}\,Fe_{0.00\text{-}0.22})_2O_5(OH)_4$$

کلریت: ترکیـب کـانی‌هـای کلریـت تجزیـه شـده در نمـــودار طبقـــه‌بنـــدی Hey (۱۹۵۴) در محـــدوده کلینـــوکلر و پیکنوکلریـــت واقـــع شـــده اســـت (شـکل ۷-A). فرمـول کلریـت بـر اسـاس ۱۰ کـاتیون و ۱۴ اکسیژن به این صورت محاسبه شده است:

$$(Mg_{3.01\text{-}4.11}Fe_{1.2\text{-}2.03}Al^{VI}_{0.73\text{-}0.93})^M$$
$$(Si_{3.06\text{-}3.13}Al^{IV}_{0.87\text{-}0.94})^TO_{10}(OH)_8$$

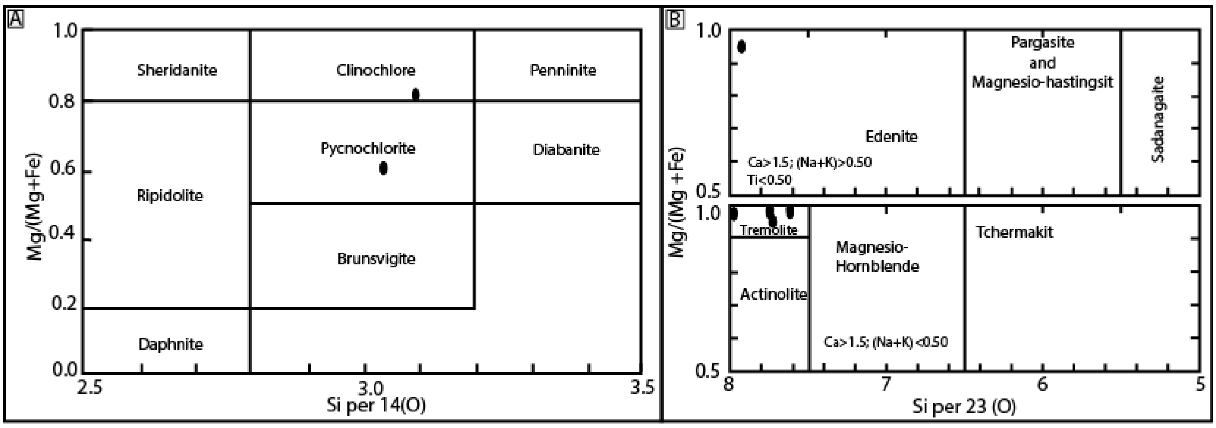
تمـامی Fe در سـاختمان کـانی، Fe^{2+} فـرض شـده اسـت. تغییـرات ترکیبـی کلریـت‌هـای تجزیـه شـده کـم است. Mg اصلی‌تـرین تشـکیل‌دهنـده سـایت اکتاهـدرال (M) بـوده و مقـدار Fe^{2+} در آن بـه نسـبت بـالا اسـت. مقـــــــــــدار MnO(0.41-0.27Wt%)، TiO_2(0.08-0.05Wt%) و Cr_2O_3(0.015-0.01Wt%) بـــه نســـبت کم اسـت. جـدول ۱ ترکیـب شـیمی کـانی‌هـای کلریـت تجزیـه شـده در سـنگ‌هـای مطالعـه شـده را نشـان می‌دهد.

آمفیبول: ترکیـب کـانی‌هـای آمفیبـول تجزیـه شـده بـر اسـاس طبقـه‌بنـدی Leake و همکـاران (۱۹۹۷) در محـدوده ترمولیـت و یـک نمونـه در محـدوده ادنیـت قـرار مـی‌گیـرد (شـکل ۷-B). فرمـول آمفیبـول بـر اسـاس ۱۵ کـاتیون و ۲۳ اکسـیژن بـه ایـن صـورت محاسبه شده است (جدول ۱):

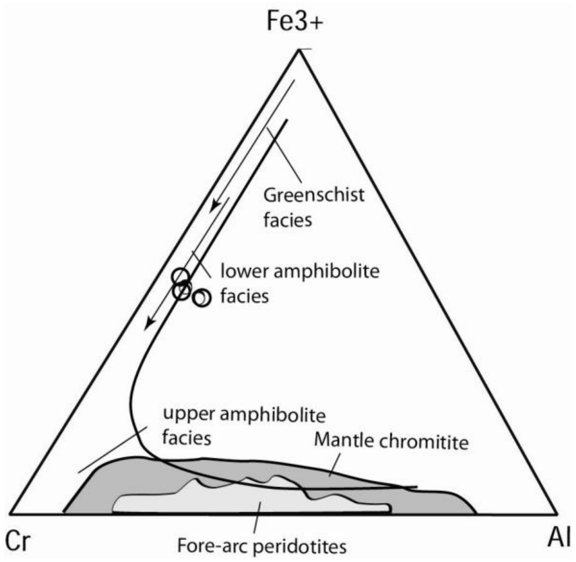
$$Ca_{1.5\text{-}1.83}Mg_{3.61\text{-}5.2}Fe_{0.14\text{-}0.3}Si_{7.63\text{-}8.2}$$
$$Al_{0.14\text{-}0.47}O_{22}\,(OH)_2$$

مقـدار #Mg بـه نسـبت بـالا و برابـر (۰/۹۳ تـا ۱/۰۰) بـوده امـا $XFe^{2+}=Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ بسـیار پایین (۰/۰۰ تا ۰/۰۷) است.

اسـپینل: کـانی‌هـای اسـپینل تجزیـه شـده دارای مقـادیر بـالای آهـن (61-43wt%) امـا بـا مقـادیر کـم آلومنیـوم (13-2.82wt%) اسـت. نمونـه‌هـای تجزیـه شـده بـر اسـاس نمـودار Fe^{3+}-Al-Cr (Evans and Frost, 1975) در محـدوده اسـپینل‌هـای رخسـاره آمفیبولیـت تحتـانی واقـع مـی‌شـود (شـکل ۸).



شکل ۷- ترکیب شیمی A) کلریت و B) آمفیبول در متاپریدوتیت‌های پیرانشهر



شکل ۸- نمودار Fe^{3+}-Al-Cr (Evans and Frost, 1975)، موقعیت اسپینل در متاپریدوتیت‌های پیرانشهر در رخساره آمفیبولیت تحتانی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- داده‌های معرف تجزیه ریزکاو الکترونی پلی‌مورف‌های سرپانتین، کلریت، آمفیبول و اسپینل در متاپریدوتیت‌های پیرانشهر

Min.	Atg	Atg	Ctl	Ctl	Lz	Lz	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Chl	Chl	Spl	Spl
SiO_2	41.97	45.70	42.36	40.76	40.57	38.19	55.63	55.12	57.20	57.08	56.38	31.38	29.01	0.60	1.77
TiO_2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.02	0.05	0.00	0.03	0.09	0.05	0.29	0.29
Al_2O_3	2.84	4.56	0.04	0.14	0.34	0.00	1.61	0.85	1.46	1.41	1.67	13.59	15.02	3.03	2.82
FeO	3.03	3.55	5.47	2.83	2.82	10.68	1.91	2.53	1.40	1.26	1.76	14.43	23.05	59.81	61.00
MnO	0.05	0.07	0.36	0.09	0.08	0.08	0.09	0.12	0.05	0.06	0.03	0.27	0.41	0.84	0.77
MgO	37.54	33.65	36.14	38.76	40.70	39.67	25.44	24.51	24.76	24.06	24.79	27.65	19.13	2.76	1.49
CaO	0.24	3.06	0.27	0.14	0.11	0.06	11.44	10.00	12.09	12.49	11.89	0.03	0.06	0.00	0.00
Na_2O	0.02	0.11	0.03	0.00	0.01	0.01	0.28	2.09	0.35	0.47	0.45	0.04	0.07	0.00	0.00
K_2O	0.00	0.09	0.06	0.00	0.00	0.00	0.05	0.16	0.07	0.05	0.10	0.03	0.04	0.00	0.00
Cr_2O_3	0.84	0.84	0.02	0.02	0.00	0.71	0.53	0.51	0.51	0.57	0.43	0.01	0.02	29.74	31.20
SUM	86.52	91.64	84.75	82.75	84.63	89.42	97.03	95.98	98.07	97.52	97.52	87.52	86.86	98.03	98.30
(O)	7	7	7	7	7	7	23	23	23	23	23	14	14	4	4
Si	1.90	1.92	2.08	2.01	1.94	1.78	7.63	7.73	8.26	7.80	8.20	3.13	3.06	0.06	0.02
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
Fe	0.17	0.13	0.22	0.12	0.13	0.00	0.22	0.26	0.21	0.14	0.26	1.20	2.03	1.79	1.85
Al	0.40	0.47	0.00	0.02	0.49	0.00	0.26	0.14	0.43	0.23	0.49	1.60	1.87	0.12	0.13
Mn	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.04	0.02	0.02
Mg	2.53	2.11	2.65	2.85	2.90	2.75	5.20	5.12	3.58	4.90	3.61	4.11	3.01	0.15	0.08
Ca	0.01	0.14	0.01	0.01	0.01	0.00	1.68	1.50	1.75	1.83	1.73	0.00	0.01	0.00	0.00
Na	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07	0.57	0.10	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00	0.05	0.06	0.06	0.15	0.06	0.12	0.00	0.00	0.84	0.89
SUM	4.92	4.84	5.00	5.00	5.00	5.00	15.46	14.51	15.09	14.58	15.14	10.07	10.01	2.99	2.99

ژئوشیمی متاپریدوتیت‌های پیرانشهر

جـدول ۲ ترکیـب اکسـیدهای عناصـر اصـلی بـه همـــراه ترکیـــب کـــانی‌شناســـی نـــورم CIPW متاپریدوتیت‌هـای پیرانشـهر را نشـان مـی‌دهـد. میـزان LOI نمونـه‌هـای تجزیـه شـده ۳/۳۵ تـا ۱۱/۶۲ اسـت. محاســـبه درصـــد ســـرپانتینی شـــدن در نمونـــه‌هـــای مطالعـه شـده بـر اسـاس فرمـول 100/18*LOI Wt.% (Parkinson and Pearce, 1998) انجـام شـده اسـت که بـر ایـن اسـاس میـزان سـرپانتینی شـدن نمونـه‌هـا در محدوده‌ای از ۱۸/۶۱ تا ۶۴/۵۵ درصد قرار دارد.

جدول ۲- نتایج تجزیه XRF متاپریدوتیت‌های پیرانشهر و ترکیب نورماتیو (CIPW)کانی‌ها؛ (FV-23-11 و FV-19-2 پریدوتیت سرپانتینی شده و نمونه‌های FV-23-B و FV-25 سرپانتینیت است.)

Sample	FV-23-11	FV-19-2	FV-23-B	FV-25
(Wt%)				
SiO_2	43.48	42.65	40.38	40.19
Al_2O_3	0.90	0.18	1.42	0.42
Fe_2O_3	3.19	3.18	3.15	3.84
FeO	5.73	5.71	5.75	6.81
CaO	0.95	0.60	2.42	1.05
Na_2O	0.03	0.04	0.02	0.01
K_2O	0.01	0.02	0.01	0.03
MgO	41.62	41.55	34.45	35.38
TiO_2	0.11	0.08	0.10	0.08
MnO	0.15	0.15	0.15	0.15
Cr_2O_3	0.32	0.33	0.32	0.33
L.O.I	3.35	5.37	11.62	11.58
SUM	99.84	99.87	99.93	99.88
CIPW Norm (Wt%)				
Or	0.06	0.12	0.07	0.18
Ab	0.25	0.34	0.17	0.08
An	2.37	0.28	4.27	1.18
Di	1.95	2.23	7.32	3.72
Hyp	30.55	31.09	32,87	37.83
Ol	59.47	60.37	49.36	49.96
Ilm	0.00	0.15	0.21	0.17
Mt	4.63	4.89	5.18	6.31
Cm	0.47	0.52	0.54	0.56
Total	99.66	99.98	99.98	99.99

بحث

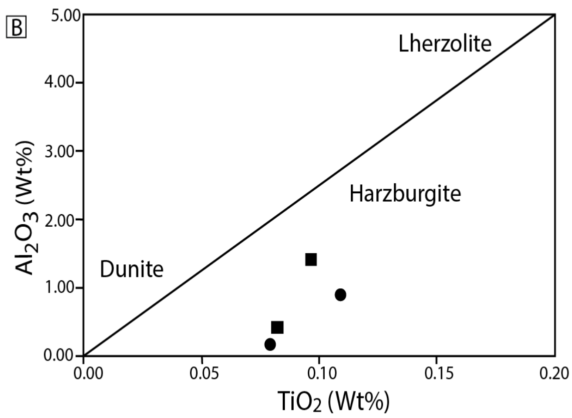
ترکیب پروتولیـت متاپریـدوتیت‌هـای پیرانشــهر: بـه دلیـل ســرپانتینی شــدن شــدید بیشــتر نمونـــه‌هـا، تعیین دقیق ترکیـب مـودال سـنگ‌هـای بررسـی شـده امکان پـذیر نیسـت. بنـابراین، طبقـه‌بنـدی و نامگـذاری صحیح‌تـر سـنگ‌هـا، بـا روش نـورم CIPW و محاسـبه مقادیر کانی‌ها از مقـادیر نورمـاتیو تجزیـه‌هـای بـی‌آب، انجام گرفت.

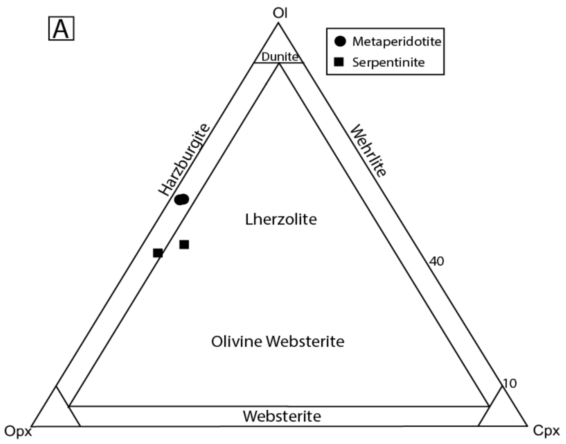
ترکیـب پروتولیـت سـنگ‌هـای مـورد مطالعـه بـا اســتفاده از نمــودار نورمــاتیو مثلثــی Ol-Opx-Cpx (Coleman, 1977) تعیـین شـد (شـکل ۹-A). بـا توجـه بـه ایـن نمـودار، نمونـه‌هـای مطالعـه شـده بـیش‌تـر در

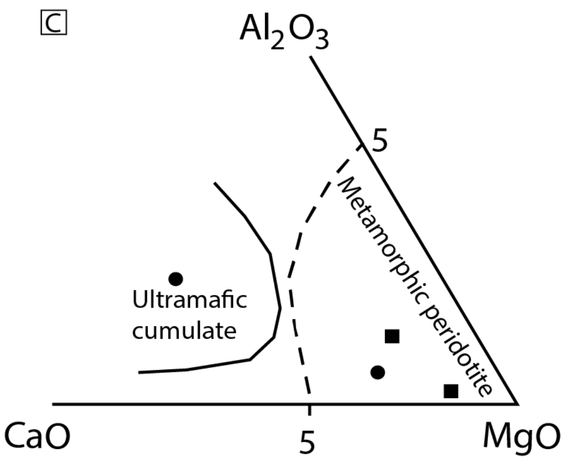
محدوده هارزبورژیت و کمتر لرزولیت واقع شده‌اند. بر اساس نمودار Al_2O_3 در مقابل TiO_2 (شکل ۹-B) (Winter, 2001؛ Brown and Mussett, 1993) ترکیب نمونه‌ها هارزبورژیت ارزیابی می‌شود. در نمودار مثلثی Al_2O_3-CaO-MgO (شکل ۹-C) (Coleman, 1977) نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده پریدوتیت‌های دگرگونی وابسته به افیولیت‌ها قرار می‌گیرد.

بررسی نمودار تغییر عناصر اصلی متاپریدوتیت‌ها: بر اساس نمودار عناصر اصلی نمونه‌های تجزیه شده، در میزان Cr_2O_3، Fe_2O_3، MnO و SiO_2 تشابه شیمیایی داشته اما در درصد وزنی Al_2O_3، CaO، MgO و TiO_2 تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود (شکل ۱۰).این تفاوت را شاید به توان در ارتباط با تأثیر سرپانتینی شدن در تحرک عناصری مثل: Ca ،Al و Mg در نظر گرفت (Savov *et al*., 2005).

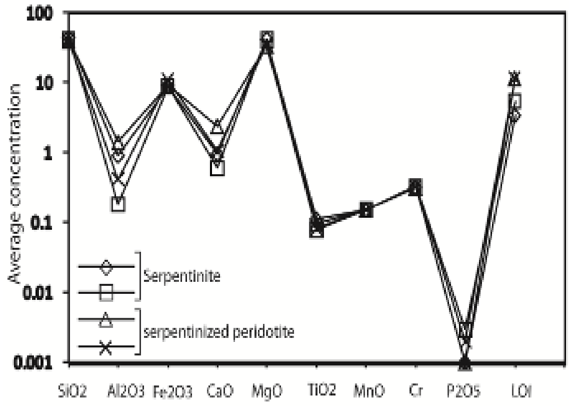
PH و Eh محیط از عوامل مؤثر در کنترل تحرک پذیری عناصر است. تحرک پذیری Al در سنگ‌های مطالعه شده را می‌توان به فرآیند سرپانتینی شدن این سنگ‌ها نسبت داد. Al در اسیدیته ۷ تا ۸ پایدارترین حالت را دارد اما در PH<4 و PH>8 به صورت Al^{3+} و $Al(OH)^{4-}$ از محیط خارج می‌شود (Maynard, 2011). فرآیند سرپانتینی شدن معمولا در PH>8 انجام می‌گیرد.







شکل ۹- A) ترکیب پروتولیت متاپریدوتیت‌های پیرانشهر بر اساس ترکیب نرماتیو Ol-Opx-Cpx (Coleman, 1977)؛ B) نمودار Al_2O_3 در مقابل TiO_2 که ترکیب نمونه‌ها در محدوده هارزبورژیت قرار می‌گیرد. C) نمودار Al_2O_3-CaO-MgO (Coleman, 1977) که غالب نمونه‌ها در محدوده پریدوتیت دگرگونی واقع شده است. یکی از نمونه‌ها در محدوده پریدوتیت کومولایی قرار گرفته که شاید به توان علت آن را به حضور کانی‌های کربناته طی فرآیندهای سرپانتینی شدن سنگ‌ها نسبت داد.



شکل ۱۰- نمودار اکسیدهای عناصر اصلی در متاپریدوتیت‌های پیرانشهر

واکنش‌های دگرگونی و ژئوترموبارومتری متاپریدوتیت‌های پیرانشهر: بر اساس مجموعه کانی‌های دگرگونی در متاپریدوتیت‌های پیرانشهر، شرایط ترمودینامیکی دما و فشار تشکیل سنگ‌ها در دو مرحله مورد بررسی قرار گرفته است:

الف) سرپانتینی شدن پریدوتیت‌ها در مرحله دگرسانی: در این مرحله پلی‌مورف‌های دما پایین سرپانتین (کریزوتیل و لیزاردیت) تشکیل شده و بافت غالب در این سنگ‌ها بافت‌های سودومورفی غربالی و بستایت است. بافت‌های سودومورفی سرپانتین (بافت غربالی و بستایت) در سنگ‌های افیولیتی، مخصوص واکنش‌های آب‌گیری بوده که در شرایط سرپانتینی شدن استاتیک در کف اقیانوس تشکیل می‌شود (Wicks and Whittaker, 1977).

تعیین شرایط حرارت و فشار تشکیل پریدوتیت‌های سرپانتینی شده (مرحله اول): بر اساس دمای پایداری کریزوتیل، دمای تشکیل این سنگ‌ها پایین‌تر از ۲۵۰ درجه سانتیگراد تعیین می‌شود (شکل ۱۱، رابطه ۲):

رابطه ۲: Lz/Ctl$\rightarrow$Atg (Auzende *et al.*, 2006)

با در نظر گرفتن شرایط دگرگونی کف اقیانوسی، فشار دگرگونی این سنگ‌ها نیز کمتر از یک کیلوبار تعیین می‌شود (محدوده خاکستری در شکل ۱۱).

ب) تشکیل سرپانتینیت‌های آنتی‌گوریت‌دار: به دنبال سرپانتینی شدن پریدوتیت‌ها، در مراحل بعدی در شرایط دما و فشار بالاتر به علت عملکرد مرحله دگرگونی پیشرونده، واکنش‌ها به سمت تولید ترمولیت، کلینوکلر و پلی‌مورف دما بالای سرپانتین یعنی آنتی‌گوریت پیش رفته است. لیزاردیت و کریزوتیل با افزایش دما به آنتی‌گوریت تبدیل شده است. آنتی‌گوریت پلی‌مورف دما بالای سرپانتین بوده و در رخساره شیست سبز بالایی تا آمفیبولیت تحتانی پایدار است (Güartekin and Albayrak, 2006).

با افزایش بیشتر دما، ترمولیت و اسپینل آهن‌دار (دگرگونی) در اثر مصرف کلینوکلر ظاهر شده است (رابطه‌های ۳ و ۴).

رابطه ۳: Chl+Cal+Ta=Tr+Spl+Dol+H_2O

رابطه ۴: Dol+Chl+Zo=Spl+Cal+Ta+H_2O

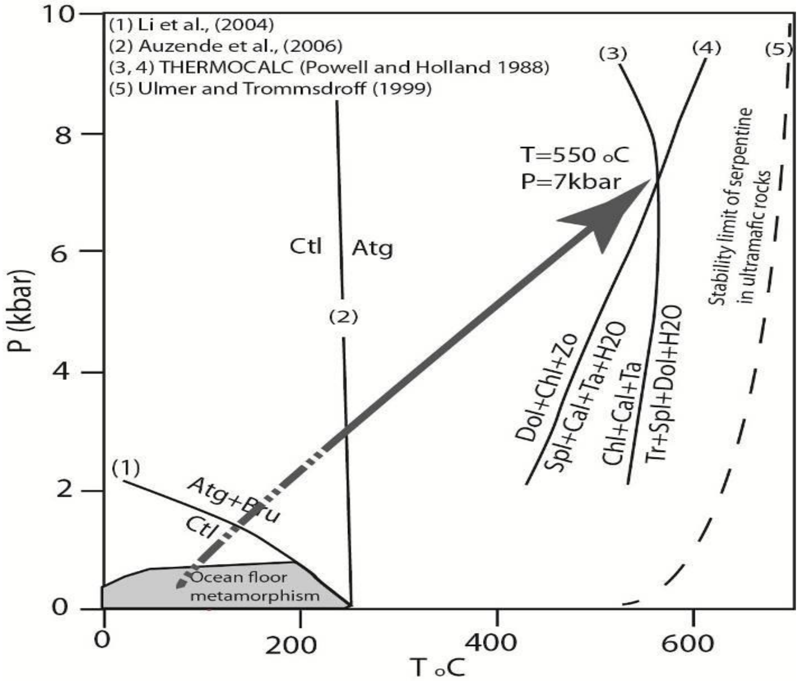
ترمولیت همچنین، می‌تواند با افزایش دما در اثر مصرف آنتی‌گوریت تشکیل شود.

$$Atg+6Qtz+2Dol \rightarrow Tr+4CO_2+H_2O$$

تعیین شرایط حرارت و فشار تشکیل سرپانتینیت‌های آنتی‌گوریت‌دار (مرحله دوم):

الف) حرارت و فشارسنجی سرپانتینیت‌های دارای آنتی‌گوریت با برنامه ترموکالک: حرارت و فشار تشکیل سنگ‌های مورد مطالعه در این

مرحله بر اساس واکنش‌های تعادلی (با برنامه ترموکالک: (Powell and Holland, 1988) محاسبه شد (شکل ۱۱). حرارت و فشار محاسبه شده در حدود ۵۵۰ درجه سانتیگراد و ۷ کیلوبار (شکل ۱۱) منطبق با دگرگونی رخساره آمفیبولیت تحتانی محاسبه شد.



شکل ۱۱- تعیین دما و فشار دگرگونی در متاپریدوتیت‌های پیرانشهر

ب) حرارت‌سنجی سرپانتینیت‌های دارای آنتی‌گوریت با استفاده از ترکیب اسپینل: ترکیب شیمی اسپینل در این سنگ‌ها (نمودار $Al-Fe^{3+}-Cr$، شکل ۱۰) دگرگونی سنگ‌های مورد مطالعه در رخساره آمفیبولیت تحتانی و نتایج به دست آمده از واکنش‌های تعادلی ترموکالک را تأیید می‌کند. کانی‌های اسپینل دگرگون شده در رخساره آمفیبولیت تحتانی فقیر از Al و غنی‌شده از Fe بوده و مقادیر Cr در آنها در مقایسه با اسپینل‌های گوشته‌ای پایین‌تر است (Farahat, 2008).

ج) حرارت‌سنجی سرپانتینیت‌های دگرگونی دارای آنتی‌گوریت با استفاده از کلریت: کلریت در سنگ‌هایی با محدوده وسیعی از ترکیبات شیمیایی و شرایط ترمودینامیکی تشکیل می‌شود. تشکیل کلریت به صورت محلول جامد بوده و می‌تواند درجات متغیری از جانشینی Al با Si را در سایت‌های تتراهدر و جانشینی Mg با Fe را در سایت‌های اکتاهدر نشان دهد. دمای ظهور کلریت در سنگ‌های دگرگونی، ۲۷۰ درجه سانتیگراد است (Schiffman and Fridleifsson, 1991) که البته با افزایش مقدار Al^{IV} دمای تشکیل آن نیز افزایش می‌یابد (Cathelineau and Nieva, 1985). دمای پایداری کلریت مرتبط با شرایط فشار بوده و در شرایط فشار بالا (P=8kbar) دمای شکست آن به ۸۵۰ درجه سانتیگراد می‌رسد (Vidal *et al*., 2001). افزایش فشار، باعث افزایش مقادیر Al^{IV} و Al^{VI} در کلریت می‌شود (Vidal *et al*., 2001). بیشتر ترمومترهای متداول کلریت بر اساس مقدار Al^{IV} در آن کالیبره شده‌اند.

ترمومترهـــایی کـــه بـــر اســـاس مقـــدار Al^{IV} کـــالیبره شـده‌انـد بـرای شـرایط دمـا پـایین کـالیبره شـده و در شـرایط فشـار بـالا نمـی‌تـوان از آنهـا اسـتفاده کـرد (Vidal *et al.*, 2001). البتـه بایـد در نظـر داشـت کـه مقدار Al در ترکیـب کلریـت عـلاوه بـر عامـل افـزایش درجه دگرگونی همچنـین، مـی‌توانـد تـابعی از ترکیـب شـیمیایی سـنگ نیـز باشـد (López-Munguiral *et al.*, 2002). بـالاترین مقـدار Al در کلریـت مربـوط بــه ســنگ‌هــای رســی دگرگــون شــده بــوده و در ســـنگ‌هـــای اســـیدی، مقـــادیر آن متوســـط و در سنگ‌هـای متابازیـک و اولترامافیـک مقـادیر آن کمتـر اسـت (Zane *et al.*, 1998). کلریـت در سیسـتم‌هـای بازیـک نسـبت بـه سیسـتم‌هـای اسـیدی بـا مقـادیر Mg>Fe مشـــخص مـــی‌شـــود. Cathelineau (۱۹۸۸) ارتباط دمـا بـا آلومنیـوم تتراهـدرال (Al^{IV}) در کلریـت را بـر اسـاس معادلـه زیـر عنـوان کـرده اسـت (ایـن ترمـــومتر بـــرای دماهـــای ۱۳۰ تـــا ۳۱۰ درجـــه سانتیگراد کالیبره شده است):

$$Al^{IV}T(°C)=321.98(Al^{IV})-61.92$$

در اســـــــتفاده از ترمـــــــومتری کلریـــــــت (Cathelineau, 1988) بـــرای ســـنگ‌هـــای مـــورد مطالعــه، دمــای دگرگــونی ســنگ‌هــا در حــدود ۳۰۰ درجـه سـانتیگراد محاسـبه شـد. مقـادیر کمتـر دمـای محاســـبه شـــده بـــا روش ترمـــومتری کلریـــت در سـرپانتینیت‌هـای دگرگـون شـده در منطقـه مطالعـه شده را شاید به تـوان بـه ترکیـب شـیمیایی پروتولیـت این سنگ‌هـا (پروتولیـت پریـدوتیتی بـا Mg بـالا و Al پایین) نسبت داد.

بـــه اعتقـــاد Zane و همکـــاران (۱۹۹۸) دماهـــای محاسـبه شـده توسـط ترمومترهـای مختلـف تـک کـانی کلریت، نتایج کـاملا متفـاوتی را بـه دست مـی‌دهـد کـه دلیل آن در ارتبـاط بـا ترکیبـات متفـاوتی از کلریـت (بـه ویـــژه تفـــاوت در مقـــادیر Al^{IV} در متاپلیـــت‌هـــا و متابازیـک‌هـا) بـوده کـه در کالیبراسـیون ترمومترهـای مختلـــف اســـتفاده شـــده اســـت. Essene و Peacor (۱۹۹۵) و Merriman و Peacor (۱۹۹۹) نیـــــــــــز گزارش کردنـد کـه تمـامی دماهـای بـه دسـت آمـده بـا اســـتفاده از ترمومترهـــای کلریـــت صـــحیح نبـــوده و استفاده از این ترمومترها باید با دقت زیاد باشد.

Torabi (۲۰۱۲) دمـــــــــــای دگرگـــــــــــونی متاپریـــدوتیت‌هـــا در افیولیـــت جنـــدق را بـــر اســـاس حضـــور کلریـــت منیزیـــوم‌دار حـــدود ۷۲۰ درجـــه ســـانتیگراد (متعلـــق بـــه دگرگـــونی‌هـــای رخســـاره آمفیبولیـت بـالایی) تعیـین کـرده اسـت. بـه اعتقـاد Spear (۱۹۹۵) کلریـــت منیزیـــوم‌دار در ســـنگ‌هـــای متاپریـــدوتیت تـــا بخـــش‌هـــای بـــالایی رخســـاره آمفیبولیت (۷۴۰ درجه سانتیگراد) پایدار است.

بـا توجـه بـه مطالـب بـالا، حـرارت و فشـار اوج دگرگـونی در سـرپانتینیت‌هـای آنتـی‌گوریـت‌دار بـر اســـاس مجموعـــه کـــانی‌هـــای دگرگـــونی کلسـیت/دولومیت، آنتـی‌گوریـت، کلینـوکلر، ترمولیـت و اسـپینل در حـدود ۵۵۰ درجـه سـانتیگراد و هفـت کیلوبار تعیین مـی‌شـود. دمـا و فشـار بـه دسـت آمـده در محـدوده پایـداری آنتـی‌گوریـت (Ulmer and Trommsdroff, 1995) واقـع شـده اسـت (شـکل ۱۱).

پلـی‌مـورف‌هـای سـرپانتین و اهمیـت آنهـا در بررسـی تحـولات تکتـونیکی متاپریـدوتیت‌هـای پیرانشـــهر: تشـکیل انـواع کـانی‌هـای سـرپانتین می‌تواند با محـیط تشـکیل، تبلـور دوبـاره و جـایگزینی آنهـا تغییـر کنـد (O'Hanley, 1996). لیزاردیـت و کریزوتیـل، محصـول دگرسـانی اسـتاتیک در شـرایط کـف اقیـانوس بـوده در حـالی کـه آنتـی‌گوریـت بـه همـراه کلینـوکلر و ترمولیـت در شـرایط دمـا و فشـار بـالاتری تشـکیل مـی‌شـود (Güartekin and Albayrak, 2006).

بـا توجـه بـه مطالعـات پتروگرافـی، روابـط بـافتی، واکـنش‌هـای دگرگـونی، نتـایج طیـف‌سـنجی رامـان و

داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی کانی‌ها، سرپانتینی شدن متاپریدوتیت‌های پیرانشهر به دو صورت انجام شده است:

الف) سرپانتینی شدن درجای (static) پریدوتیت‌ها در کف اقیانوس و تشکیل لیزاردیت، کریزوتیل، بافت غربالی و بستایت: بافت‌های سودومورفی سرپانتین مانند: بافت غربالی و بستایت در سنگ‌های افیولیتی، ویژه واکنش‌های آب‌گیری بوده و در شرایط سرپانتینی شدن استاتیک تشکیل می‌شود (Wicks and Whittaker, 1977).

به اعتقاد González-Mancera و همکاران (۲۰۰۹) بافت سودومورفی بستایت با میزان کروم و آلومینیوم بالاتر که از تجزیه اورتوپیروکسن حاصل شده‌اند در ارتباط بوده و همچنین، شواهدی از اولین مرحله سرپانتینی شدن پریدوتیت‌ها است. سرپانتینی شدن اولیه پریدوتیت‌های گوشته‌ای، شاید توسط نفوذ آب به شکستگی‌های موجود در پوسته اقیانوسی (دمای زیر ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه‌ی سانتیگراد) توسعه پیدا کند یا ممکن است حاصل چرخش آب گرم در اعماق لیتوسفر اقیانوسی سرد شده در پشته‌های میان اقیانوسی باشد (Boudier *et al.*, 2009. بنابراین، تشکیل پلی‌مورف‌های دما پایین سرپانتین (لیزاردیت و کریزوتیل)، بافت‌های سودومورفی غربالی و بستایت در متاپریدوتیت‌های سرپانتینی شده و سرپانتینیت‌های پیرانشهر به احتمال زیاد مرتبط با دگرسانی درجای پوسته اقیانوسی نئوتتیس باشد. پوسته اقیانوسی نئوتتیس در زمان پرمین تا تریاس بین بلوک لوت و حاشیه شمال‌شرق گندوانا تشکیل شده است (Golonka, 2004).

ب) فرورانش یا فرارانش پوسته اقیانوسی و تشکیل آنتی‌گوریت: با افزایش شرایط دما و فشار دگرگونی، کانی‌های آنتی‌گوریت±تالک با مصرف پلی‌مورف‌های دما پایین سرپانتین بر روی بافت‌های قبلی شروع به رشد کرده است. پلی‌مورف دما بالای سرپانتین (آنتی‌گوریت) و بافت به هم نفوذ کرده (interpenetrative) به علت دگرگونی پیشرونده طی فرورانش پوسته اقیانوسی، بالاآمدگی سنگ‌ها یا برخورد قاره‌ای به وجود آمده‌اند (González-Mancera *et al.*, 2009). با این توصیف، پریدوتیت‌های سرپانتینی شده و سرپانتینیت‌های دارای آنتی‌گوریت پیرانشهر، شاید مرتبط با فرورانش یا برخورد قاره‌ای نئوتتیس تشکیل شده باشد. پوسته اقیانوسی نئوتتیس در زاگرس ایران از اواخر ژوراسیک شروع به فرورانش کرده است (Golonka, 2004). با در نظر گرفتن موقعیت افیولیت‌های پیرانشهر در انتهایی‌ترین بخش شمال‌غربی کمربند افیولیتی زاگرس شاید به توان دگرگونی‌های پیشرونده در سرپانتینیت‌های آنتی‌گوریت‌دار پیرانشهر را به فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس یا تصادم نهایی قاره‌ای پلیت عرب با میکرو قاره ایران مرکزی نسبت داد.

نتیجه‌گیری

سنگ‌های متاپریدوتیتی پیرانشهر به میزان متفاوت سرپانتینی شده‌که بر این اساس در دو گروه اصلی پریدوتیت‌های سرپانتینی شده و سرپانتینیت‌ها تقسیم‌بندی می‌شود. سنگ‌های سرپانتینیت بر اساس مجموعه کانی‌ها و ویژگی‌های بافتی، در سه زیر گروه شامل: سرپانتینیت‌های حاصل هیدراسیون، سرپانتینیت‌های دارای آنتی‌گوریت و سرپانتینیت‌های لیستونیتی دسته‌بندی شده‌اند. انواع پلی‌مورف‌های سرپانتین در متاپریدوتیت‌های پیرانشهر با استفاده از مطالعات پتروگرافی، روابط بافتی، طیف‌سنجی رامان و

تجزیـه ریزکـاو الکترونـی بـه طـور دقیـق شناسـایی شـده‌انـد. سـرپانتینیت‌هـای حاصـل هیدراسـیون بیش‌تر حاوی پلـی‌مـورف‌هـای دمـا پـایین سـرپانتین (کریزوتیـل و لیزاردیـت) بـا بافـت غالـب غربـالی و بسـتایت هسـتند کـه بـه نظـر مـی‌رسـد محصـول دگرسـانی اسـتاتیک محـیط کـف اقیـانوس باشـد. سرپانتینیت‌هـای دارای آنتـی‌گوریـت بـیش‌تـر حـاوی پلی‌مورف دمـا بـالا (آنتـی‌گوریـت) بـا بافـت غالـب در هـم نفـوذ کـرده اسـت. ایـن سـنگ‌هـا محصـول دگرگونی دینـامیکی در شـرایط دمـا و فشـاری بـالاتر هسـتند. سـرپانتینیت‌هـای لیسـتونیتی در امتـدا شکسـتگی‌هـای سـرپانتینیت‌هـا تحـت تـأثیر جریـان سـیال غنـی از CO_2 و Ca تشـکیل شـده و بافـت برشـی دارد. شـرایط دمـا و فشـار دگرگـونی کـف اقیـانوس در سـرپانتینیت‌هـای حاصـل هیدراسـیون به ترتیـب کمتـر از ۲۵۰ درجـه سـانتیگراد و کمتـر از یـک کیلوبـار تعیـین شـد. سـرپانتینیت‌هـای دارای آنتی‌گوریت طـی دگرگـونی‌هـای پیشـرونده در دمـای ۵۵۰ درجـه سـانتیگراد و فشـار ۷ کیلوبـار تشـکیل شـده‌انـد. بررسـی‌هـای ژئوشـیمیایی بـا اسـتفاده از داده‌هـای سـنگ کـل نشـان مـی‌دهـد کـه پروتولیـت پریـدوتیت‌هـای دگرگـون شـده، از نـوع هـارزبورژیتی و کمتـر لرزولیتـی بـوده و بـا پریـدوتیت‌هـای دگرگونی وابسته بـه افیولیـت‌هـا مطابقـت دارد. بـا در نظـر گـرفتن موقعیـت مجموعـه افیـولیتی پیرانشـهر در انتهـایی‌تـرین بخـش شـمال‌غربـی پهنـه زاگـرس شـاید بـه تـوان دگرسـانی کـف اقیـانوس در متاپریـدوتیت‌هـای پیرانشـهر را بـه تشـکیل پوسـته اقیانوسـی نئـوتتیس در زاگـرس نسـبت داده و رخـداد دگرگـونی پیشـرونده بعـدی را حاصـل فـرورانش پوسـته اقیانوسـی یـا بسـته شـدن پوسـته اقیانوسـی و تصـادم نهـایی بلـوک‌هـای قـاره‌ای عربستان و ایران مرکزی در نظر گرفت.

سپاسگزاری

نگارنـدگان از دکتـر Tomoyuki Mizucami در دانشـگاه کانـازاوا ژاپـن بـه خـاطر همکـاری در تجزیـه رامـان اسپکتروسـکوپی و از پروفسـور Tomoaki Morishita در دانشـگاه کانـازاوا بـه خـاطر تجزیـه ریزکاو الکترونی نمونه‌ها قدردانی می‌نمایند.

منابع

Auzende, A. L., Guillot, G., Devouard, B. and Baronnet, A. (2006) Behavior of serpentinites inconvergent context: microstructural evidence. European Journal of Mineralogy 18: 21-33.

Boudier, F., Baronnet, A. and Mainprice, D. (2009) Serpentine mineral replacements of natural olivine and their seismic implications: oceanic lizardite versus subduction-related antigorite. Journal of Petrology 51: 495-512.

Brown, G. C. and Mussett, A. E. (1993) The inaccessible earth: an integrated view of its structure and composition. 2ed edition, Chapman and Hall, London.

Bucher, K. and Frey, M. (1994) Petrogenesis of metamorphic rocks. Springer, Verlag, Berlin.

Cathelineau, M. (1988) Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. Clay Minerals 23: 471-485.

Cathelineau, M. and Nieva, D. (1985) A chlorite solid solution geothermometer. The Los Azufres (Mexico) geothermal system. Contributions to Mineralogy and Petrology 91: 235-244.

Chernostey, J. V. (1975) Aggregate refractive indices and unit cell parameters of synthetic serpentine in the system MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O. American Mineralogist 60: 200-208.

Coleman, R. G. (1971) Petrologic and geophysical nature of serpentinites. Geological Society of America

82: 897-917.

Coleman, R. G. (1977) Ophiolits: ancient oceanic lithosphere? Springer, Verlag, Berlin.

Dungan, A. M. (1979) A microprobe study of antigorite and some serpentine pseudomorphs. Canadian Mineralogist 17: 771-784.

Essene, E. J. and Peacor, D. R. (1995) Clay mineral thermometry-a critical perspective. Clays and Clay Minerals 43:540-553.

Evans, B. W. and Frost, B. R. (1975) Chrome-spinel in progressive metamorphism-a preliminary analysis. Geochimica et Cosmochimica Acta 39: 959-972.

Farahat, E. S. (2008) Chrome-spinels in serpentinites of the El ideid-El Sodmein District, Central eastern desert, Egypt: their metamorphism and petrogenetic implications. Chemie der Erde 68: 193-205.

Gilg, H. A., Boni, M., Balassone, G., Allen, C. R., Banks, D. and Moore, F. (2006) Marble hosted sulfide ores in the Angouran Zn-(Pb-Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex. Mineralium Deposita 41: 1-16.

Golonka, J. (2004) Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. Tectonophysics 381: 235-273.

González-Mancera, G., Ortega-Gutiérrez, F., Proenza, J. and Atudorei, V. (2009) Petrology and geochemistry of Tehuitzingo serpentinites (Acatlán Complex, SW Mexico). Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 61: 419-435.

Groppo, C., Rinaudo, C., Cairo, S., Gastaldi, D. and Compagnoni, R. (2006) Micro-Raman spectroscopy for a quick and reliable identification of serpentine minerals from ultramafics. European Journal of Mineralogy 18: 319-329.

Güartekin, G. and Albayrak, M. (2006) Thermal reaction of antigorite: a XRD, DTA-TG work. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 133: 41-49.

Hey, M. H. (1954) A new review of the chlorites. Mineralogical Magazine 30: 277-292.

Khodabandeh, A. A. (2004) Geological quadrangle map of Naghadeh 1:100000, Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).

Kretz, R. (1983) Symbols for rock-forming minerals. American Mineralogist 68: 277-279.

Kunze, G. (1956) Die gewellte strukture des antigorits. Zeitschrift Fur Kristallographie108: 82-107.

Kunze, G. (1958) Die gewellte strukture des antigorits. Zeitschrift Fur Kristallographie110: 282-320.

Kunze, G. (1961) Struktur theoretische Grundlagen und ihre praktische Bedeutung für die weitere serpentin- forschung. Fortschritte Mineralogie 39: 206-324.

Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kato, A., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J. A., Maresch, W. V., Nickel, E. H., Rock, N. M. S., Schumacher, J. C., Smith, D. C., Stephenson, N. C. N., Ungaretti, L., Whittaker, E. J. W. and Youzhi, G. (1997) Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. American Mineralogist 41: 1355-1370.

López-Munguiral, A., Nieto, F. and Morata, D. (2002) Chlorite composition and geothermometry: a comparative HRTEM/AEM-EMPA-XRD study of Cambrian basic lavas from the Ossa Morena zone, SW Spain. Clay Minerals 37(2): 267-281.

Maynard, J. B. (2011) Geochemistry of sedimentary ore deposits. Springer, Verlag, Berlin.

Merriman, R. J. and Peacor, D. R. (1999) Very low-grade metapelites: mineralogy, microfabrics and measuring reaction progress. In: Low-grade metamorphism (Eds. Frey, M. and Robinson, D.) 10-60. Blackwell Publishing, Oxford.

Nabavi, M. H. (1976) Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).

O'Hanley, D. S. (1996) Serpentinites: records of tectonic and petrological history. Oxford University Press, Oxford.

Parkinson, I. J. and Pearce, J. A. (1998) Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg 125): evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting. Journal of Petrology 39: 1577-1618.

Powell, R. and Holland, T. J. B. (1988) An internally consistent dataset with uncertainties and correlations; 3, application to geobarometry, worked examples and a computer program. Journal of Metamorphic Geology 6: 173-204.

Savov, I. P., Ryan, J. G., D'Antonio, M., Kelley, K. and Mattie, P. (2005) Geochemistry of serpentinized peridotites from the Marina forearc Conical Seamount, ODP Leg 125: implications for the elemental recycling at subduction zones. Geochemistry, Geophysics, Geosystem 6 (4): 1-24.

Schiffman, P. and Fridleifsson, G. O. (1991) The smectite-chlorite transition in drillhole Nj-15, Nesjavellir geothermal field, Iceland: XRD, BSE and electron microprobe investigation. Journal of Metamorphic Geology 9: 679-696.

Spear, F. S. (1995) Metamorphic phase equilibra and pressure-temperature-time paths. Mineralogical Society of American, Washington.

Torabi, G. (2012) Metamorphism of mantle peridotites in Jandaq ophiolite (Central Iran). Petrology 3(11):1-18 (in Persian).

Vidal, O., Parra, T. and Trotet, F. (2001) A thermodynamic model for Fe-Mg aluminous chlorite using data from phase equilibrium experiments and natural pelitic assemblages in the 100-600 °C, 1-25 kbar range. American Journal of Science 6: 557-592.

Ulmer, P. and Trommsdroff, V. (1995) Serpentine stability to mantle depths and subduction-related magmatism. Science 268: 858-861.

Whittaker, E. J. W. and Wicks, F. J. (1970) Chemical differences among the serpentine polymorphs: a discussion. American Mineralogist 55: 1025-1047.

Wicks, F. J. and Whittaker, E. J. W. (1975) A reappraisal of the structure of serpentine minerals. Canadian Mineralogist 13: 227-243.

Wicks, F. J. and Whittaker, E. J. W. (1977) Serpentine textures and serpentinization. Canadian Mineralogist 15: 459-488.

Wicks, F. J., Whittaker, E. J. W. and Zussman, J. (1977) An idealized model for serpentine texture after olivine. Canadian Mineralogist 15: 446-458.

Wicks, F. J. and Plant, A. G. (1979) Electron-microprobe and X-ray-microbeam studies of serpentine textures. Canadian Mineralogist 17: 785-830.

Wicks, F. J. and O'Hanley, D. S. (1988) Serpentine minerals: structure and petrology. In: Hydrous phyllosilicates (exclusive of micas) (Ed. Bailey, S.W.) Reviews in Mineralogy 19: 91-167. Mineralogical Society of America, Washington D.C.

Winter, J. (2001) An introduction to igneous and metamorphic petrology. Prentic Hall, New Jersey.

Zane, A., Sassi, R. and Guidotti, C. V. (1998) New data on metamorphic chlorite as a petrogenetic indicator mineral, with special regard to greenshist-facies rocks. Canadian Mineralogist 36: 713-726.

Serpentinization of the Piranshahr peridotites: investigations on serpentine polymorphs and metamorphic evolutions of the metaperidotites

Farzaneh Valinasab Zarnagh, Robab Hajialioghli * and Mohsen Moazzen

Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The study area is located in NW of Piranshahr town, Western Azerbaijan province. Based on the petrography, mineralogy and textural relations, the peridotites studied are classified into two groups: serpentinized peridotites and serpentinites. The second type, on the base of serpentine polymorphs and texture can be classified into three subgroups in turn: a) hydrated serpentinites which are characterized by low temperature serpentine polymorphs (chrysotile and lizardite), b) antigorite (high temperature serpentine polymorph) bearing serpentinites which formed at relatively high T and P conditions having interpenetrative texture and c) listwanitic serpentinites with brecciated texture containing of minerals as serpentine, chlorite and high amounts of carbonates. Distinguishing of serpentine polymorphs in the investigated rocks has been done using Raman spectroscopy and microprobe analysis. Formation of low-T serpentine polymorphs in the hydrated serpentinites are most likely related to the in-situ alteration of oceanic crust whereas antigorite in the metamorphic serpentinites is formed due to regional metamorphism during subduction and/or subsequent closure of ocean. Tremolite, clinochlore/picnochlore and Fe-rich spinel are coexisting minerals with antigorite. Temperature and pressure of the antigorite bearing serpentinites are obtained on the basis of equilibria reactions using THERMOCALC, as 550 ºC and 7 kbar, respectively. On the base of olivine and pyroxene norm, the protolith composition of the Piranshahr metaperidotites is determined as harzburgite and less lherzolite. The high MgO and relatively low CaO and Al_2O_3 contents of the investigated rocks indicate ophiolitic characteristics of the Piranshahr metaperidotites. Considering the location of the Piranshahr ophiolites at the end of the northwestern part of the Zagros ophiolitic belt, it can be concluded that hydrated serpentinites and antigorite-bearing serpentinites are formed in relation with static oceanic floor alteration and subsequent dynamic metamorphism during subduction and/or closure of the Neotethys ocean, respectively.

Key words: Raman Spectroscopy, Mineral chemistry, Serpentine polymorphs, Metaperidotite, Piranshahr, Sanandaj-Sirjan zone

* hajialioghli@tabrizu.ac.ir