

اسپینل، تنها فاز کریستالوگرافی پایدار در مقابل سرپانتینیته شدن

در پریدوتیت‌های آمیزه افیولیتی بافت در استان کرمان

نادیه محمدی^۱، حمید احمدی پور^۲، سیما پیغمبری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد پترولوژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استادیار دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- دانشجوی دکتری پترولوژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۱۱/۹ تاریخ تصویب: ۱۳۹۰/۴/۱۹

چکیده

آمیزه افیولیتی بافت با مساحت تقریبی ۶۱۷ کیلومتر مربع، در امتداد گسل‌های بافت و شهر بابک در جنوب استان کرمان قرار گرفته است. مطالعات صحرایی و میکروسکوپی بر روی پریدوتیت‌ها، کرومیت‌ها و دونیت‌های همراه در منطقه، حاکی از تشکیل آن‌ها در شرایط گوشته‌ای است. در اثر شدت بالای سرپانتینیته شدن در پریدوتیت‌های منطقه، تقریباً تمامی کانی‌های اولیه مانند الیوین و پیروکسن، از بین رفته‌اند و اسپینل‌ها تنها کانی مقاوم اولیه در مقابل سرپانتینیته شدن در این سنگ‌ها هستند که در سنگ‌های کاملاً سرپانتینیته شده، سالم باقی مانده‌اند. در این مطالعه از ترکیب شیمیایی هسته‌های غیردگرسان اسپینل‌های موجود، برای تعیین ژنز و محیط تکتونیکی پریدوتیت‌ها و کرومیت‌های منطقه استفاده شده است. سنگ‌های منطقه را از نظر منشأ، می‌توان به دو گروه تقسیم کرد: یکی پریدوتیت‌ها که خود شامل هارزبورژیت، دونیت و لرزولیت بوده و به کمپلکس نوع آلپی تعلق دارند و در بین آن‌ها، هارزبورژیت‌ها، احتمالاً در نتیجه ذوب بخشی ۱۵ تا ۲۰ درصدی، از یک گوشته لرزولیتی بارور بوجود آمده‌اند. گروه دوم کرومیت‌ها هستند که می‌توان برای آن‌ها یک منشأ ماگمایی را پیشنهاد داد. کرومیت‌های مورد مطالعه از نوع پادیفرم بوده و به صورت لایه‌های غیرممتد و یا عدسی توسط دونیت‌های کاملاً سرپانتینیته شده احاطه شده‌اند. کرومیت‌های موجود در منطقه، با میانگین Cr_2O_3 برابر ۶۲/۸ درصد و $Cr\#$ برابر ۰/۸۳ از نوع کرومیت غنی از Cr می‌باشند و جزء کانسنگ‌های کرومیت درجه یک دنیا محسوب می‌شوند. با استفاده از مقدار $Mg\#$ و $Cr\#$ موجود در آن‌ها مشخص می‌شود که کرومیت‌های منطقه از مذابی با ترکیبی یونیته در زون سوپراسابداکشن متبلور شده‌اند. محیط تشکیل پریدوتیت‌ها و کرومیت‌های منطقه، احتمالاً یک زون سوپراسابداکشن در محیط پشت قوسی می‌باشد.

واژگان کلیدی: اسپینل، آمیزه افیولیتی بافت، سرپانتینیته، سرپانتینیته شدن، کرومیت

مقدمه

بوده و به میزان زیادی تحت تأثیر دگرسانی قرار گرفته‌اند. در اثر دگرسانی (سرپانتینیته شدن)، کانی‌های اولیه سنگ مانند الیوین و یا پیروکسن به شدت سرپانتینیته شده‌اند و کم‌تر کانی‌های سالم اولیه باقی مانده‌اند. اسپینل تنها کانی اولیه مقاوم در برابر

اسپینل‌ها، کانی‌هایی پایدار و مقاوم در برابر دگرسانی بوده و شاخص‌های سنگ شناختی قابل اطمینانی هستند که در طول دگرسانی تغییر ترکیبی چندانی پیدا نمی‌کنند [6]. سنگ‌های پریدوتیتی موجود در مجموعه افیولیتی بافت، دارای مقادیر متفاوتی اسپینل

بحث

آمیزه افیولیتی بافت، جزئی از افیولیت نائین-بافت بوده و بین طول‌های جغرافیایی ۵۶' ۵۵ و ۴۷' ۵۶ و عرض‌های جغرافیایی ۲۹' ۱۴ و ۳۶' ۲۹ در طول گسل‌های بافت و شهر بابک در استان کرمان قرار گرفته است (شکل ۱، قسمت A). از نظر زمین‌شناسی، این آمیزه، بین زون سنندج- سیرجان و ارومیه- دختر قرار گرفته و با آن‌ها مرز گسله دارد (شکل ۱، قسمت B). پریدوتیت‌ها و کرومیتیت‌ها، از عمده‌ترین سنگ‌های موجود در آمیزه فوق هستند که دارای مقادیر متفاوتی اسپینل هستند.

معرفی انواع اسپینل‌های موجود در آمیزه

افیولیتی بافت

در سرپانتینیت‌های آمیزه افیولیتی بافت، دو گروه اسپینل دیده می‌شود: یکی اسپینل موجود در پریدوتیت‌ها که اکثراً از نوع کروم اسپینل بوده و دیگری اسپینل موجود در کرومیتیت‌ها که از نوع کرومیت هستند. اسپینل موجود در پریدوتیت‌ها بین ۱ تا ۳ درصد سنگ را تشکیل داده و در زمینه‌ای سرپانتینیتی قرار گرفته‌اند. کرومیت موجود در کرومیتیت‌ها حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد آن‌ها را به خود اختصاص داده است و سنگ میزبان آن‌ها دونیت است که به‌طور کامل، سرپانتینیتی شده است.

اسپینل موجود در پریدوتیت‌ها را از نظر مورفولوژی و بافت، می‌توان به سه گروه تقسیم کرد: یکی آن‌هایی که نیمه‌شکل‌دار تا کاملاً شکل‌دار بوده و دارای مرزهای مضرس تا صاف هستند و در اندازه‌های بین ۱ تا ۴ میلی‌متر دیده می‌شوند (شکل ۲-ا). اکثر این اسپینل‌های درشت به‌طور نامنظم در سنگ پخش بوده

دگرسانی در این سنگ‌هاست که حتی در پریدوتیت‌های کاملاً سرپانتینیتی شده نیز هنوز سالم مانده است، از این رو تعیین ترکیب شیمیایی اسپینل در این سنگ‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از آنجائی که اسپینل یک فاز کریستالوگرافی بسیار پایدار است که معمولاً غیر دگرسان باقی می‌ماند و بنابراین یک ابزار پتروژنتیکی بسیار مفید است [9]، به همین خاطر در این بحث از ترکیب اسپینل‌های موجود در پریدوتیت‌ها و کرومیتیت‌های منطقه و نمودارهای وابسته به آن‌ها برای تشخیص پتروژنز و محیط تکتونیکی منطقه مورد مطالعه، استفاده شده است.

روش تحقیق

بررسی‌های انجام شده بر روی سرپانتینیت‌های آمیزه افیولیتی بافت، شامل مطالعات صحرایی، آزمایشگاهی (میکروسکوپی و SEM) و مطالعات ژئوشیمیایی می‌باشد. تصاویر SEM، توسط میکروسکوپ الکترونی LEO 1530 (HT=15.00 kV, Mag=2.00KX signal) در دانشگاه کارلسروهه آلمان تهیه شده است. آنالیزهای الکترون میکروپروب، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی مدل JEOL JXA 8900 SUPERPROBE با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ کیلووات و جریان اشعه‌ای ۱۵ نانوآمپر و قطر ۵ میکرومتر در دانشگاه مونستر آلمان انجام شدند. در این بررسی از آنالیزهای الکترون میکروپروب اسپینل‌های این منطقه که توسط Shfaii Moqadam و همکاران تهیه شده، نیز استفاده گردیده است [21].

نیز هرگاه دچار شکستگی شده‌اند، شکستگی‌های مذکور، توسط رگه‌های کریزوتیل، لیزاردیت و یا رگه‌های نوع پرکننده شکاف (crack-seal) پر شده‌اند (شکل ۳-ا). از جمله بافت‌های مهم موجود در اسپینل‌های منطقه ترک‌های کششی است (pull-apart crack) است. شکستگی‌های کششی هنگامی درون دانه‌های منفرد ایجاد می‌گردند که تنش‌هایی که عمود بر جهت شکستگی می‌باشند، آزاد گردد. بنابراین شکستگی‌ها، معمولاً عمود بر محور طویل دانه و به عبارتی عمود بر جهت طویل‌شدگی دانه می‌باشد (شکل ۳-ب) و در بین این شکستگی‌ها، معمولاً رگه‌های سرپانتین رشد کرده‌اند. گاهی نیز ترک‌های کششی مذکور، سبب شده‌اند که دانه اسپینل شکسته و قطعات آن کاملاً از هم جدا شوند و نسبت به هم در فاصله دورتری قرار بگیرند (شکل ۳-ج).

از مشخصه سرپانتینیت‌های منطقه، فازهای تغییرات فراوانی است که به شدت آن‌ها را تحت تاثیر قرار داده و سبب ایجاد شکستگی و رگه‌های فراوان در آن‌ها گشته است. دانه‌های کروم‌اسپینل در مقابل این فازهای تغییرشکلی بسیار مقاوم هستند و کمتر دچار شکستگی شده‌اند. در شکل ۴-ا کروم‌اسپینل به صورت یک پورفیروکلاست عمل کرده و سودوفیرهای لیزاردیتی عمود بر سطوح آن رشد کرده‌اند. شکل ۴-ب نیز یک کروم‌اسپینل خودشکل را نشان می‌دهد که در تماس با یک رگه کریزوتیلی قرار گرفته و سبب انحناى رگه شده است. رگه مذکور نتوانسته به درون دانه اسپینل نفوذ کند و دانه را دور زده است. میزان دگرسانی در اسپینل‌های منطقه پایین است و هرگاه که دچار دگرسانی شده‌اند، دگرسانی آن‌ها از اطراف و یا در امتداد شکستگی‌های موجود در آن‌هاست که حاشیه‌های مگنتیتی و یا فریت کرومیتی را ساخته‌اند.

و حاوی ادخال‌های الیون و یا پیروکسن می‌باشند. پاره‌ای از این کروم‌اسپینل‌ها تحت تاثیر فشارهای گوشته‌ای کشیده شده‌اند و گاهی به‌صفت‌شدگی این نوع اسپینل در سنگ دیده می‌شود. گروه دوم، کروم‌اسپینل‌هایی هستند که در قالب دانه‌های ریز و بی‌شکل (با قطر حداکثر نیم میلی‌متر) دیده می‌شوند و به‌صورت بین دانه‌ای رشد کرده‌اند. میزان دگرسانی در این اسپینل‌ها بیش‌تر از اسپینل‌های نوع اول است و غالباً توسط آنتی‌گوریت‌های ریشه‌مانند در بر گرفته شده‌اند. گروه سوم آن‌دسته از کروم‌اسپینل‌هایی هستند که بافت ورمیکولار نشان می‌دهند و با الیون و یا ارتوپروکسن هم‌رشدی داشته‌اند (شکل ۲-ب). در این بافت معمولاً الیون‌های همراه دگرسان شده و از بین رفته‌اند و کروم‌اسپینل‌ها با اشکال کشیده و کرمی‌شکل، سالم باقی مانده‌اند.

کرومیت‌های موجود در آمیزه افیولیتی بافت از نوع نیامی (پادیفرم) بوده و به‌صورت لایه‌های غیرممتد و یا عدسی توسط دونیت‌های سرپانتینیتی‌شده احاطه شده‌اند. نوع لایه‌ای آن‌ها به‌صورت رگه‌هایی با ضخامت چند متر در سنگ مادر دونیتی دیده می‌شود که از سطح به سمت عمق، به ضخامت آن افزوده می‌شود. بافت غالب در آن‌ها، بافت نوع پراکنده است که در زمینه سرپانتینیتی قرار گرفته‌اند. به دلیل اعمال نیروهای تکتونیکی چه در حین جایگزینی کرومیت‌ها و چه بعد از آن، شکستگی‌های فراوانی در دانه‌های کرومیت ایجاد شده که با زوایای مختلف، یکدیگر را قطع کرده‌اند. در میان انبوه شکستگی‌های ایجادشده در دانه‌های کرومیت، در اثر فازهای تغییرات بعدی، رگه‌های سرپانتینیتی به میزان زیادی گسترش یافته‌اند (شکل ۲-ج)، اما خود دانه‌های کرومیت غیر دگرسان مانده‌اند. اسپینل‌های موجود در پریدوتیت‌های منطقه

دو گروه قرار می‌گیرند. میزان $Y_{Fe} = Fe^{3+}/(Fe^{3+} + Al + Cr)$ در کرومیت‌های منطقه مورد مطالعه نیز بسیار پایین بوده (شکل ۷-۷) که این امر نشان‌دهنده میزان دگرسانی کم در آن‌ها می‌باشد. روند افزایش دگرسانی نیز در شکل نشان داده شده است [11].

با توجه به درصد عناصر موجود در اسپینل‌های موجود در پریدوتیت‌های منطقه، می‌توان آن‌ها را به ۴ گروه تقسیم نمود: - کروم اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت‌ها: این دسته از کروم اسپینل‌ها دارای مقدار متوسط Cr_2O_3 (۳۸٪) و Al_2O_3 (۳۰٪) و بالاترین مقدار FeO (۱۷٪) هستند و با توجه به نسبت MgO و Al_2O_3 در محدوده آرایه گوشته‌ای قرار می‌گیرند و جزء پریدوتیت‌های تهی شده هستند (شکل ۷-۷).

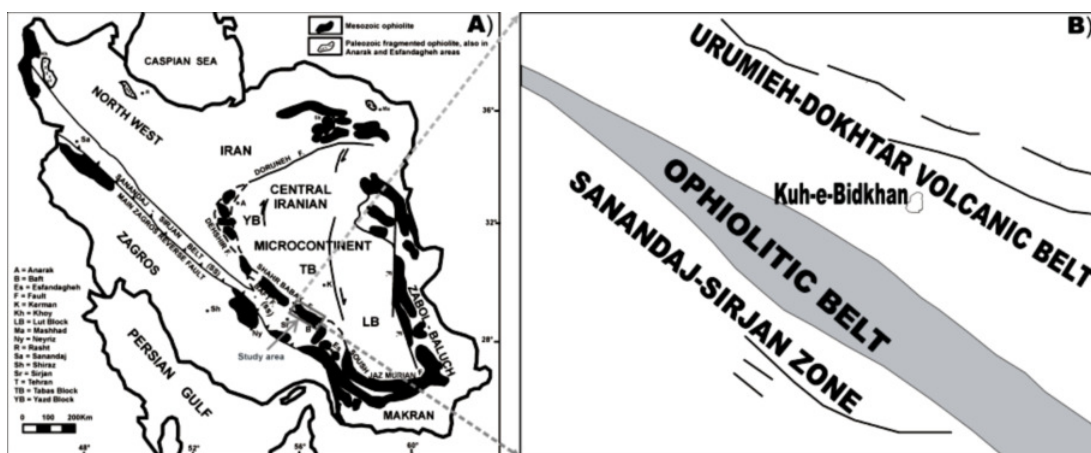
- کروم اسپینل‌های موجود در لرزولیت‌ها. این دسته از کروم اسپینل‌ها غنی از Al_2O_3 (۵۸/۶٪) و فقیر از Cr_2O_3 (۱۰/۵٪) هستند، بالاترین میزان NiO (۰/۶٪) و کم‌ترین میزان FeO (۱۰/۴٪) را به خود اختصاص داده‌اند. این نوع ترکیب، احتمالاً نشان‌دهنده یک ترکیب پیکوتیتی (اسپینل قهوه‌ای) است [4].

- کروم اسپینل‌های موجود در دونیت‌ها. این دسته از کروم اسپینل‌ها دارای مقدار متوسط FeO (۱۴٪) و میزان نسبتاً بالای NiO (۰/۴٪) هستند، ضمن این‌که دارای بالاترین میزان $Mg\#$ هستند. - کرومیت‌های موجود در کرومیت‌ها. این دسته از کرومیت‌ها دارای بالاترین مقدار Cr_2O_3 (۶۳/۴۸٪) و کم‌ترین مقدار Al_2O_3 (۸/۳۲٪) هستند. زمانی‌که ترکیب شیمیایی این گروه از اسپینل‌ها در نمودارهای تشخیص پیاده می‌شوند، در اکثر نمودارها در میدان بونینیت قرار می‌گیرند. این مسأله نشان می‌دهد، آن‌ها از یک مذابی مشابه با ترکیب بونینیتی متبلور شده‌اند.

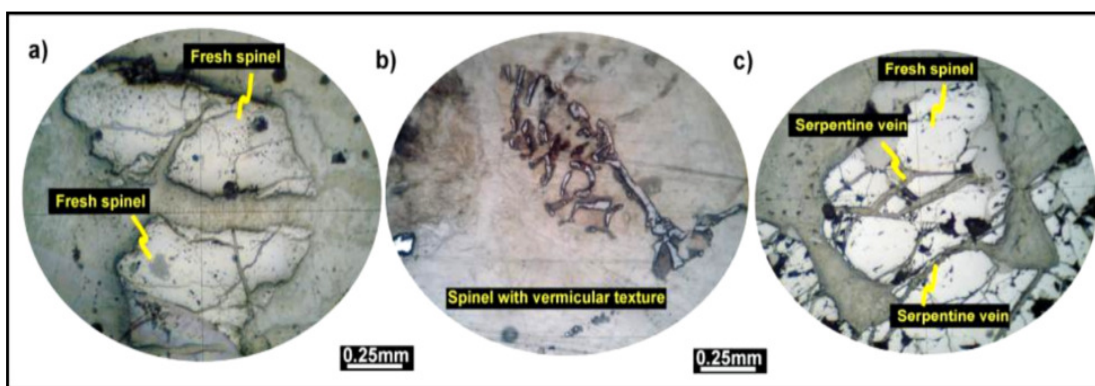
شکل ۵-۷ و b تصاویر SEM از کروم اسپینل‌های موجود در سنگ مادر هارزبورژیتی را نشان می‌دهد که در شکل a، دانه‌های کروم اسپینل کاملاً سالم هستند و فقط حاوی شکستگی‌های فراوانی هستند و در شکل b آغاز دگرسانی آن‌ها را در امتداد شکستگی‌ها و یا حاشیه‌های کروم اسپینل را نشان می‌دهد که تشکیل فریت کرومیت را داده است. شکل ۶ نیز تصویر شماتیک از نحوه مگنتیتی شدن دانه‌های نیمه خودشکل کروم اسپینل را نشان می‌دهد که مگنتیتی شدن از اطراف بلورها شروع شده و به سمت مرکز در حال پیشروی است. در بخش وسط، دانه‌های کروم اسپینل هنوز سالم باقی مانده‌اند. در مرحله بعد نیز از اطراف توسط یک هاله سرپانتینی نازک در بر گرفته شده‌اند.

ترکیب شیمیایی اسپینل‌های موجود در آمیزه افیولیتی بافت

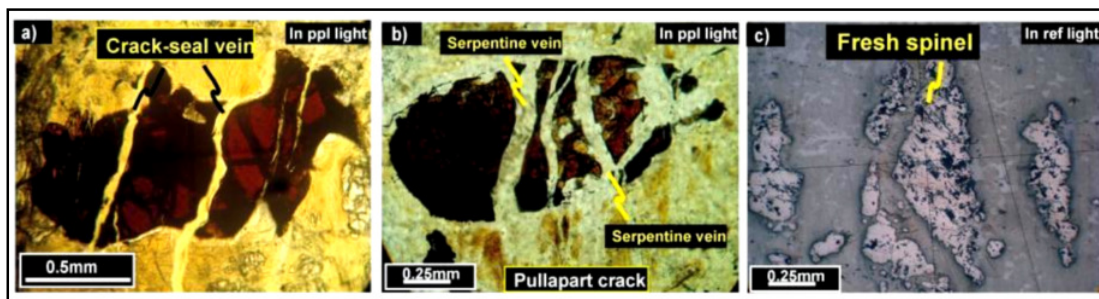
نتایج تجزیه الکترون میکروپروب اسپینل‌های آمیزه افیولیتی بافت در جدول ۱، نشان داده شده است و بر حسب نوع سنگ میزبان، ترکیب آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. ترکیب شیمیایی انواع اسپینل‌های منطقه در نمودار مثلثی $Cr^{3+} - Al^{3+} - Fe^{3+}$ (شکل ۷-۷) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، اکثر اسپینل‌های منطقه در نزدیکی ضلع Cr-Al قرار می‌گیرند و از لحاظ ترکیبی یا غنی از کروم و یا غنی از آلومینیم هستند و برخی ترکیب حدواسط این دو عنصر را دارا هستند. شکل ۷-۷ نشان می‌دهد که اسپینل‌های موجود در کرومیت‌ها بیش‌ترین مقدار کروم را به خود اختصاص داده و در عوض لرزولیت دارای بیش‌ترین مقدار آلومینیم است. اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت‌ها در حدواسط این



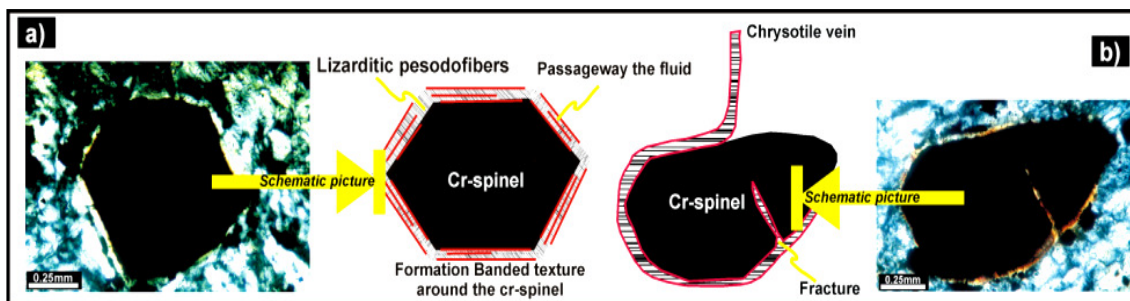
شکل ۱- A- نقشه پراکندگی افیولیت‌های ایران [5] و موقعیت آمیزه افیولیتی مورد مطالعه در بین آن‌ها. B- موقعیت زمین‌شناسی آمیزه افیولیتی بافت (Baft ophiolitic belt) که بین زون دگرگونی سنندج- سیرجان و کمربند آتشفشانی ارومیه- دختر قرار گرفته است [۳]



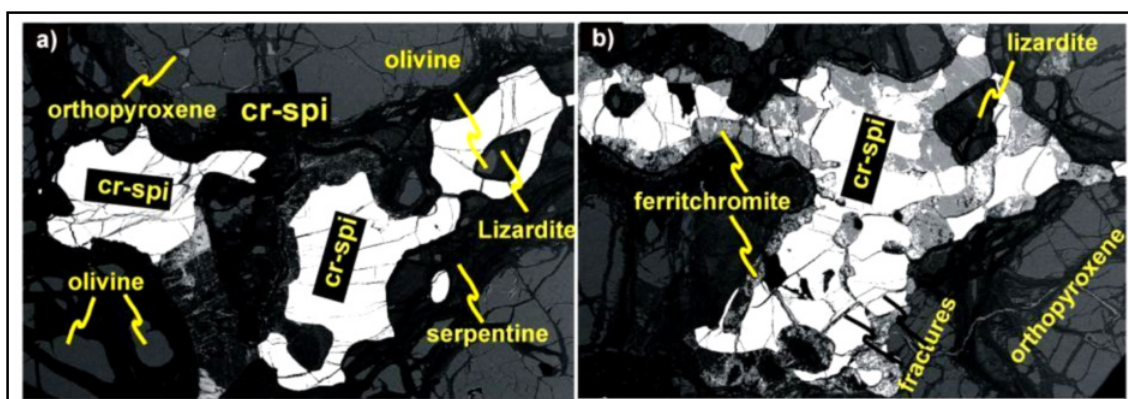
شکل ۲- a- دانه‌های نیمه‌شکل‌دار و سالم اسپینل در پریدوتیت‌های آمیزه افیولیتی بافت (در نور منعکس). b- کروم‌اسپینل با بافت ورمیکولار در سنگ مادر هارزبورژیته (در نور منعکس). c- نمایی از دانه‌های کرومیت غیردگرسان در کرومیت‌ها که در بین آن‌ها رگه‌های سرپانتین رشد کرده است (در نور منعکس)



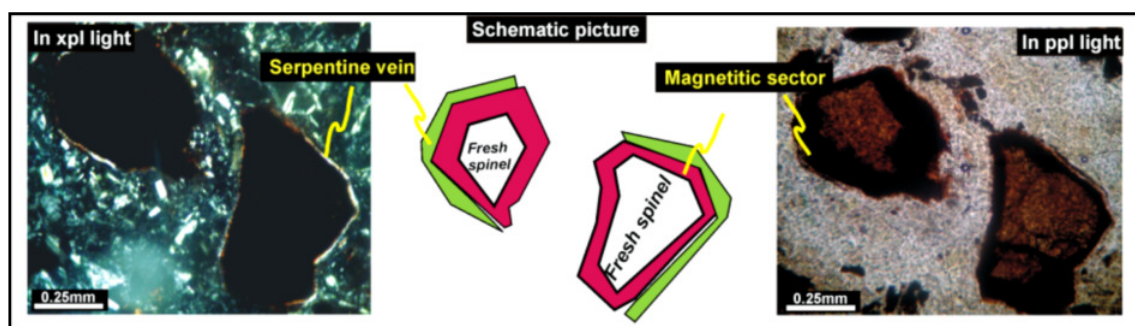
شکل ۳- a- رشد رگه‌های نوع پرکننده شکاف (crack-seal) در بین شکستگی‌های موجود در دانه کروم‌اسپینل موجود در پریدوتیت‌های آمیزه افیولیتی بافت (در نور طبیعی). b- نمایی از شکستگی‌های کششی (pull-apart crack) در کروم‌اسپینل که عمود بر محور طولیل دانه هستند (در نور طبیعی). c- شکستگی‌های کششی در یک دانه کروم‌اسپینل که سبب قطعه‌قطعه شدن دانه اولیه و جداشدن آن‌ها از یکدیگر شده است (در نور منعکس)



شکل ۴- مقاومت بالای دانه‌های کروم‌اسپینل را در برابر سرپانتینیته شدن در سرپانتینیته‌های آمیزه افیولیتی بافت نشان می‌دهد. a- چگونگی رشد سودوفیبرهای لیزاردیتی در اطراف یک دانه اسپینل خودشکل. در این شکل، اسپینل مانند یک پورفیروکلاست عمل کرده و سودوفیبرهای لیزاردیتی عمود بر سطوح آن رشد کرده‌اند (در نور پلاریزه). b- برخورد یک رگه کریزوتیلی با یک دانه اسپینل که نتوانسته به درون دانه نفوذ کند و دانه را دور زده است و فقط در بخش پایینی دانه اسپینل که یک شکستگی کوچک وجود داشته نفوذ کرده و در همانجا رشته‌های نازک کریزوتیل را ساخته است (در نور پلاریزه)



شکل ۵- تصاویر SEM از کروم‌اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت‌های آمیزه افیولیتی بافت. a- دانه‌های کروم‌اسپینل سالم با شکستگی‌های فراوان که در بین الیون‌های سرپانتینیته شده (با بافت شبکه‌ای) و ارتوپروکسن‌ها قرار گرفته‌اند. b- آغاز دگرسانی در دانه‌های کروم‌اسپینل که در حاشیه و یا در امتداد شکستگی‌ها، فریت کرومیت در حال تشکیل است



شکل ۶- تصویر شماتیک از نحوه مگنتیتی شدن دانه‌های نیمه خود شکل کروم‌اسپینل که مگنتیتی شدن از اطراف بلورها شروع شده و به سمت مرکز در حال پیشروی است. در بخش وسط، دانه‌های کروم‌اسپینل هنوز سالم باقی مانده‌اند. در مرحله بعد نیز توسط یک هاله سرپانتینی نازک در بر گرفته شده‌اند (هاله روشن در اطراف دانه شکل سمت چپ بالا)

اسپینل، تنها فاز کریستالوگرافی پایدار در مقابل سرپانتینیتی شدن ...

جدول ۱- نتایج تجزیه الکترون میکروپروب انواع اسپینل‌های موجود در پریدوتیت‌های آمیزه افیولیتی بافت

Representative Microprobe Analyses Of Spinel in Baft Ophiolite Melange complex.

Rock type	Harzburgite					chromitite			Dunite	Lherzolithe	
	H23	H26	H38	H71	H72	H73	CH19	CH20	CH21	D46	L55
Mineral											
SiO₂	0.01	0.06	0.01	0.00	0.01	0.07	0.05	0.04	0.01	0.05	0.00
TiO₂	0.15	0.05	0.03	0.04	0.03	0.05	0.14	0.18	0.19	0.04	0.05
Al₂O₃	25.51	29.16	42.11	28.05	27.62	27.07	8.68	9.24	8.32	50.35	58.60
Cr₂O₃	41.80	38.40	26.57	40.44	42.24	38.91	63.48	62.57	62.70	17.66	10.46
FeO_(t)	18.22	17.22	14.90	18.14	17.43	16.50	14.96	14.55	14.67	13.57	10.38
MnO	0.21	0.29	0.19	0.29	0.24	0.18	0.27	0.29	0.32	0.14	0.09
MgO	14.77	15.83	17.68	13.72	14.08	13.27	15.13	15.21	15.03	18.41	20.13
CaO	0.03	0.00	0.03	0.00	0.01	0.05	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00
NiO	0.20	0.13	0.21	0.11	0.07	0.10	0.15	0.18	0.08	0.39	0.56
Totals	101.04	101.19	101.76	100.79	101.76	96.223	102.89	102.30	101.35	100.67	100.45
Oxygen(p.f.u)	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Si	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
Ti	0.004	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.004	0.005	0.001	0.001
Al	0.896	1.000	1.358	0.983	0.960	0.992	0.320	0.342	0.311	1.585	1.784
Cr	0.985	0.884	0.575	0.950	0.985	0.956	1.571	1.552	1.574	0.373	0.214
Fe³⁺	0.112	0.110	0.066	0.065	0.054	0.045	0.100	0.095	0.105	0.038	0.001
Fe²⁺	0.342	0.309	0.275	0.386	0.376	0.384	0.292	0.286	0.285	0.266	0.224
Mn	0.005	0.007	0.004	0.007	0.006	0.005	0.007	0.008	0.009	0.003	0.002
Mg	0.656	0.687	0.721	0.608	0.619	0.615	0.706	0.711	0.711	0.733	0.775
Ca	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
Ni	0.005	0.003	0.005	0.003	0.002	0.002	0.004	0.005	0.002	0.008	0.012
tot. cat.	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Mg#	0.591	0.621	0.679	0.574	0.590	0.589	0.643	0.651	0.646	0.707	0.776
Cr#	0.524	0.469	0.297	0.492	0.506	0.491	0.831	0.820	0.835	0.190	0.107
Y_{Fe}	0.056	0.055	0.033	0.033	0.027	0.023	0.050	0.048	0.053	0.019	0.000

$$FeO_{(t)} = FeO + Fe_2O_3$$

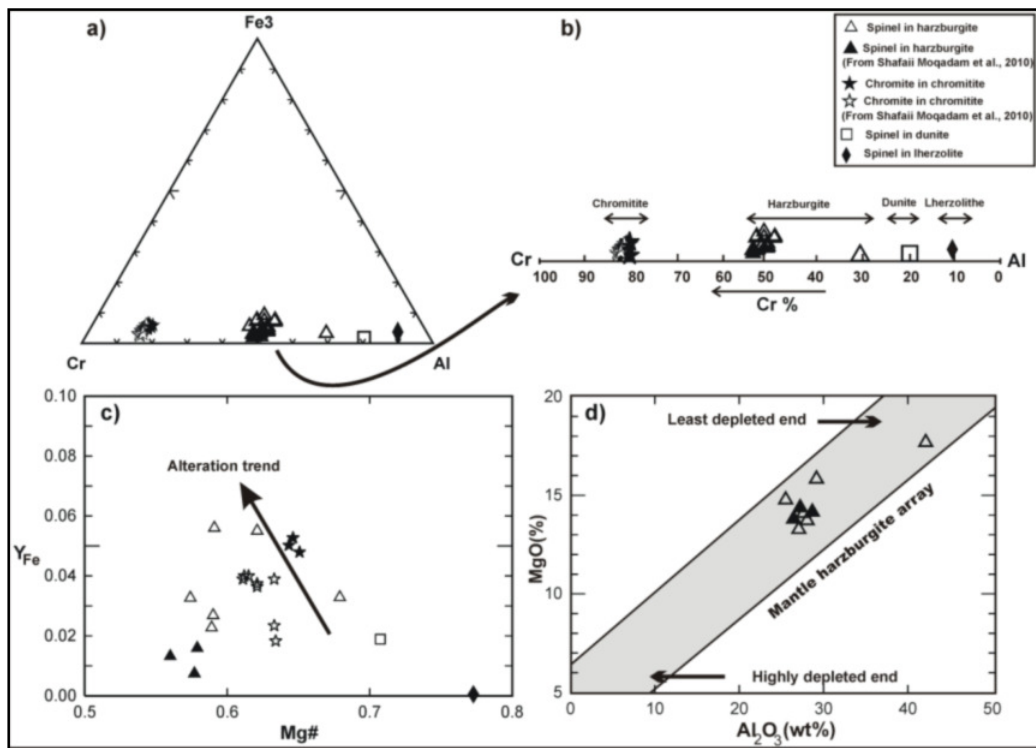
$$Cr\# = [Cr/Cr+Al]$$

$$Mg\# = [Mg/Mg+Fe]$$

$$Y_{Fe} = Fe^{3+}/(Fe^{3+} + Al + Cr)$$

۶۲/۸ درصد و میانگین Cr# برابر ۰/۸۳ مشخص می‌شود که ترکیب آن‌ها مشابه کرومیت‌های معدنی است. با استفاده از نمودارهای مربوطه نیز مشخص می‌شود که کرومیت‌های منطقه مورد مطالعه از نوع پادیرم هستند و نمودار Cr₂O₃ در مقابل TiO₂ نیز گویای این مسأله است (شکل ۹-۱).

گرچه کرومیت‌های آمیزه افیولیتی مورد مطالعه، امروزه بافت و ساخت اولیه خود را تا حدود زیادی داده‌اند، اما ترکیب شیمیایی آن‌ها هنوز قابل استفاده بوده و نشانه منشأ ماگمایی برای آن‌هاست. کرومیت‌های موجود در کرومیت‌های منطقه، از نوع کرومیت غنی از Cr می‌باشد و با میانگین Cr₂O برابر



شکل ۷- a- ترکیب اسپینل‌های موجود در سنگ‌های منطقه مورد مطالعه در نمودار مثلثی $Cr^{3+} - Al^{3+} - Fe^{3+}$.
 b- ترکیب اسپینل‌های موجود در سنگ‌های منطقه مورد مطالعه بر روی ضلع Cr-Al که کرومیت‌های موجود در کرومیتیت‌ها بیش‌ترین مقدار کروم را به‌خود اختصاص داده و در عوض آلومینوم اسپینل‌های موجود در لرزولیت دارای بیش‌ترین مقدار آلومینیم است و کروم اسپینل‌های موجود در هارزبورژیت‌ها در حدواسط این دو گروه قرار می‌گیرند.
 c- نسبت Y_{Fe} به $Mg\#$ در اسپینل‌های منطقه مورد مطالعه که میزان Y_{Fe} بسیار پایین بوده و این امر نشان‌دهنده میزان دگرسانی کم در آن‌ها می‌باشد. روند افزایش دگرسانی نیز در این شکل نشان داده شده است. روند دگرسانی از Gahlan و همکاران گرفته شده است [۱۱]. d- ارتباط مثبت MgO با Al_2O_3 در اسپینل‌های موجود در سنگ‌های مختلف آمیزه افیولیتی بافت. محدوده خاکستری هارزبورژیت‌های گوشته‌ای از العابد می‌باشد [۱]

هارزبورژیت‌ها سازگار است [10]، اما به نظر می‌رسد که شیمی کرومیت‌ها، ارتباطی با هارزبورژیت نداشته و نمی‌تواند با یک فرایند ذوب‌بخشی ساده قابل توجیه باشد. با توجه به ترکیب کرومیت در نمودارهای فوق، ملاحظه می‌گردد که روند کرومیتیت‌ها کاملاً متمایز از روند هارزبورژیت‌هاست. چنین تمایزی در میزان Ti بالاتر در کرومیت‌های موجود در کرومیتیت‌ها نسبت به هارزبورژیت‌ها نیز دیده می‌شود. چنین خصوصیات شیمیایی ممکن است بیانگر آن باشد که یک فرایند

بر طبق داده‌های موجود در جدول ۱ و شکل ۷، به‌نظر می‌رسد که کروم اسپینل‌های موجود در پریدوتیت‌های آمیزه افیولیتی بافت، از نوع اسپینل‌های دیرگداز (refractor) می‌باشند که سنگ میزبان آن‌ها در اثر ذوب‌بخشی یک سنگ مادر اسپینل‌لرزولیتی در فشار ۲۰-۱۰ کیلوپا ایجاد و از عناصری همچون Mg و Cr غنی و از Si، Fe و Al فقیر شده است [13]. نکته قابل ذکر آن است که اگرچه ترکیب شیمیایی کروم اسپینل‌های هارزبورژیتی با ماهیت تهی‌شده

سوپراسابداکشن و MORB از هم تفکیک شده‌اند [15]. در این نمودار (شکل ۹-b) پریدوتیت‌های منطقه در زون سوپراسابداکشن قرار می‌گیرند. به‌طور کلی بالا بودن مقدار Cr# در اسپینل، مشخصه اسپینل‌های محیط سابداکشن می‌باشد [7]. به‌طور کلی این‌طور نتیجه‌گیری می‌شود که پریدوتیت‌های سازنده سرپانتینیت‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده سوپراسابداکشن تشکیل شده‌اند و به‌نظر می‌رسد که محیط سوپراسابداکشن، پشت قوس باشد و نه منطقه جلوی قوس، زیرا میزان Cr# موجود در کروم اسپینل‌های منطقه مورد مطالعه کم‌تر از ۰/۶ است، درحالی‌که این مقدار در پریدوتیت‌های جلوی قوس، بیش‌تر از ۰/۶۵ بوده و حتی تا بالای ۰/۸۵ می‌رسد [9,19]. محیط تشکیل سرپانتینیت‌های منطقه مورد مطالعه با توجه به ترکیب کروم اسپینل موجود، مشابه با سرپانتینیت‌های منطقه Tehuitzingo (کمپلکس Acatlán) در جنوب غرب مکزیک هستند و برای آن‌ها نیز زون سوپراسابداکشن در محیط پشت قوس، در نظر گرفته شده است [12].

پتروژنز و محیط تشکیل کرومیت‌های موجود در آمیزه افیولیتی

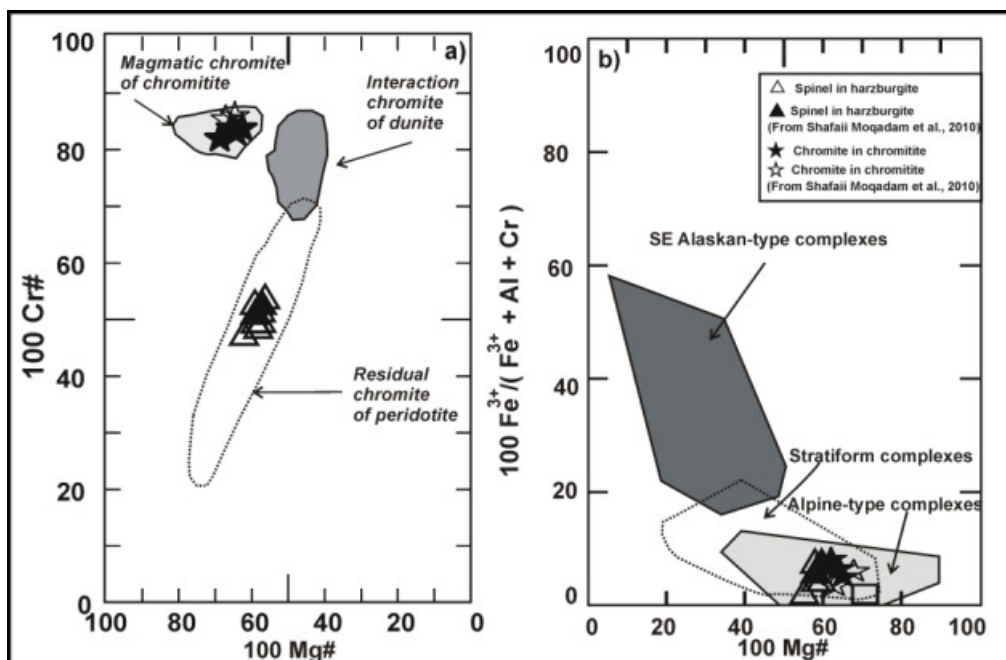
بزرگ‌ترین ذخیره معدنی در حال استخراج در آمیزه رنگین مورد مطالعه، معدن کرومیت است که در ۵ کیلومتری شمال غرب شهرستان بافت واقع شده است. از آنجائی‌که کرومیت‌های موجود در آمیزه رنگین بافت، هم به صورت عدسی‌شکل و هم به صورت لایه‌ای با گسترش طولی محدود در بین دونیت‌ها دیده می‌شوند.

خاص (یا منشأ متفاوت) به غیر از ذوب‌بخشی سنگ‌های میزبان، بایستی در تشکیل کرومیت‌های این منطقه دخیل باشد.

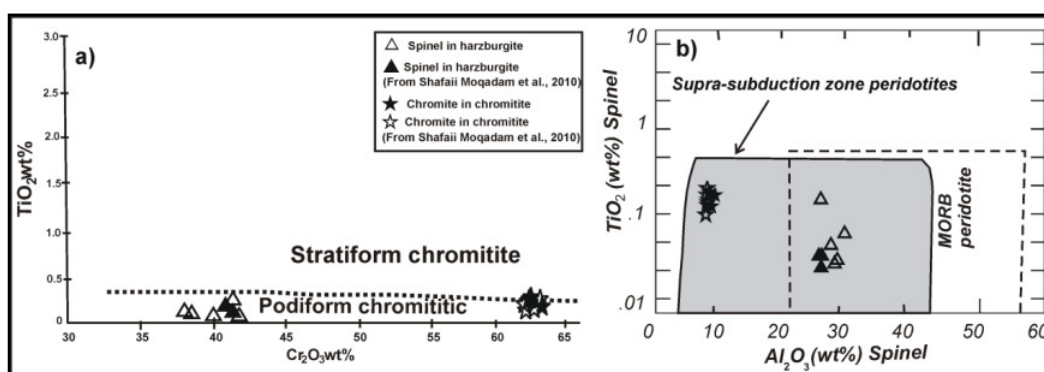
پتروژنز و محیط تشکیل پریدوتیت‌ها و سرپانتینیت‌های آمیزه افیولیتی

با این‌که فرایندهای دگرگونی و دگرسانی بعدی، به شدت خصوصیات شیمیایی و پترولوژی اولیه پریدوتیت‌های منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داده است، اما با کمک گرفتن از بافت‌های باقیمانده و شیمی کانی‌ها (به‌خصوص اسپینل) و مورفولوژی آن‌ها، می‌توان لیتولوژی اولیه را تشخیص داد که استفاده از این روش‌ها توسط محققان دیگر نیز صورت گرفته است [16,17]. به‌طور کلی سنگ‌های منطقه مورد مطالعه را از نظر منشأ، می‌توان به دو گروه تقسیم کرد، یکی پریدوتیت‌ها که خود شامل هارزبورژیت، دونیت و لرزولیت است و به‌نظر می‌رسد دارای منشأ یکسانی هستند، یعنی همه آن‌ها متعلق به کمپلکس‌های نوع آلپی بوده و در بین آن‌ها هارزبورژیت‌ها از یک تفاله گوشته‌ای با ۱۵-۲۰ درصد ذوب‌بخشی منشأ گرفته‌اند [۲] و گروه دوم کرومیت‌ها هستند که منشأ متفاوتی، نشان می‌دهند. با استفاده از مقادیر Mg# و Cr# (شکل ۸-a) مشخص می‌شود که هارزبورژیت‌های منطقه، تفاله‌های پریدوتیتی هستند که در محیط گوشته‌ای متبلور شده‌اند.

نمودار Mg# در مقابل $[Fe^{3+} / (Fe^{3+} + Al + Cr)]$ (شکل ۸-b) نیز نشان می‌دهد که تمامی اسپینل‌ها در محدوده کمپلکس نوع آلپی قرار می‌گیرند. با استفاده از نسبت Al_2O_3 و TiO_2 نیز محیط‌های پریدوتیتی



شکل ۸ - a- نمودار در $Mg\#$ در مقابل $Cr\#$ در اسپینل‌های موجود در پریدوتیت‌های آمیزه افیولیتی بافت. تمامی نمونه‌های هارزبورژی در محدوده پریدوتیت‌های تفاله‌ای و نمونه‌های کرومیتی در محدوده کرومیت‌های ماگمایی قرار می‌گیرند. محدوده کرومیت‌های ماگمایی، واکنشی و تفاله‌ای از Zhou و همکاران است [22]. b- نمودار $Mg\#$ در مقابل $Fe^{3+} / (Fe^{3+} + Al + Cr)$ و انطباق اسپینل‌های موجود در منطقه بر روی آن‌ها. محدوده‌های مربوط به انواع کمپلکس‌ها از Dick & Bullen [۹] و Jan & Windley [14] است



شکل ۹ - a- نمودار در Cr_2O_3 در مقابل TiO_2 . تمامی کرومیت‌های موجود در کرومیت‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده کرومیت‌های پادیفرم قرار می‌گیرند. شکل نقل از Bonavia و همکاران است [8]. b- نمودار Al_2O_3 در مقابل TiO_2 برای تعیین محیط تشکیل کرومیت‌های منطقه مورد مطالعه. محدوده پریدوتیت‌های زون سوپراسابداکشن و MORB از Kamenetsky و همکاران است [15]

نتایج

مطالعات صحرایی و میکروسکوپی بر روی پریدوتیت‌ها، کرومیتیت‌ها و دونیت‌های همراه در منطقه، حاکی از تشکیل آن‌ها در شرایط گشته‌ای است. سنگ‌های منطقه را از نظر منشأ، می‌توان به دو گروه تقسیم کرد: یکی پریدوتیت‌ها که خود شامل هارزبورژیت، دونیت و لرزولیت بوده و به نظر می‌رسد که به کمپلکس نوع آلپی تعلق دارند و در بین آن‌ها، هارزبورژیت‌ها، احتمالاً در نتیجه ذوب بخشی ۱۵ تا ۲۰ درصدی، از یک گشته لرزولیتی بارور بوجود آمده‌اند. گروه دوم کرومیتیت‌ها هستند که می‌توان برای آن‌ها یک منشأ ماگمایی را پیشنهاد داد. کرومیتیت‌های مورد مطالعه از نوع پادیفرم بوده و به صورت لایه‌های غیرممتد و یا عدسی توسط دونیت‌های کاملاً سرپانتینیتی شده احاطه شده‌اند. با استفاده از مقدار $Mg\#$ و $Cr\#$ موجود در آن‌ها مشخص می‌شود که کرومیتیت‌های منطقه از مذابی با ترکیب بونینیتی در زون سوپراسابداکشن متبلور شده‌اند. به طور کلی به نظر می‌رسد که ذخایر کرومیت منطقه بافت، ابتدا در مجموعه افیولیتی اولیه در داخل لایه‌های دونیتی و یا هاله‌های دونیتی درون هارزبورژیت‌های قسمت تحتانی این مجموعه تشکیل شده و سپس در مراحل بعدی در نتیجه عملکرد گسل‌های ترانسفورمی منطقه، این ذخایر به درون زون‌های برشی رانده شده و در سطح جایگزین شده‌اند. همچنین مطالعات ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که محیط تشکیل پریدوتیت و کرومیتیت‌های منطقه زون سوپراسابداکشن در محیط پشت قوس است.

بنابراین طبیعت پادیفرم (آلپی) و غیرلایه‌ای بودن آن‌ها مشخص و ثابت است. علاوه بر این، شدت بالای سرپانتینیتی شدن در دونیت‌های میزبان کرومیتیت‌ها، نشان‌دهنده تعلق آن به نوع آلپی است. با استفاده از نسبت TiO_2 و Al_2O_3 نیز مشخص می‌شود که محیط تشکیل کرومیت‌های منطقه مشابه با پریدوتیت‌هاست و در محیط سوپراسابداکشن تشکیل شده‌اند (شکل ۹-b). با استفاده از ترکیب شیمیایی کرومیت و نمودارهای مربوطه مشخص می‌شود که کرومیتیت‌های منطقه مورد مطالعه از نوع آلپی یا پادیفرم بوده که در محیط گشته‌ای تشکیل شده‌اند و ماگمای سازنده آن‌ها یک ماگمای بونینیتی است که مربوط به زون سوپراسابداکشن در محیط پشت قوس است. بر اساس مطالعات انجام‌شده [20]، گوه گشته‌ای در مناطق فرورانش (زون سوپراسابداکشن)، یکی از ایده‌آل‌ترین مکان‌ها برای تولید مذاب‌های بونینیتی است و از طرفی دیگر، مشخص گردیده که برای تشکیل کرومیتیت‌های نیامی‌شکل، وجود یک محیط آبدار الزامی بوده و چنین محیطی در گوه گشته‌ای بالای مناطق فرورانش دیده می‌شود [18]، که این خود شاهدهی دیگر بر تأیید محیط تکتونیکی سوپراسابداکشن برای تشکیل کرومیتیت‌های منطقه مورد مطالعه می‌باشد. به نظر می‌رسد که ذخایر کرومیت منطقه بافت، ابتدا در مجموعه افیولیتی اولیه در داخل لایه‌های دونیتی و یا هاله‌های دونیتی درون هارزبورژیت‌های قسمت تحتانی تشکیل شده و دارای منشأ بونینیتی هستند. سپس در مراحل بعدی در نتیجه عملکرد گسل‌های تراستی، این ذخایر به درون زون‌های برشی و یا زون‌های گسلی برشی، رانده شده و در سطح زمین و یا نزدیک به سطح، جایگزین شده‌اند.

تشکر و قدردانی

از همکاری‌های بی‌دریغ پرفسور هینز گانتر استیج و دکتر فرحناز دلیران از دانشگاه کارلسروهه آلمان برای انجام تجزیه الکترون میکروپروب کانی‌ها و تهیه تصاویر SEM تقدیر و تشکر می‌شود.

منابع

- 1- العابد، نجف زاده، ع. (۱۳۸۶). پترولوژی، ژئوشیمی و زمین‌شناسی اقتصادی کمپلکس الترامافیک سرخ‌بند در جنوب استان کرمان، رساله دکتری (Ph.D)، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۳۷۶ ص.
- 2- محمدی، ن. (۱۳۸۹). کانی‌شناسی، لرزه‌خیزی و پتروژنز سریانتینیت‌های آمیزه رنگین چهارگنبد-گوغر-باقت در استان کرمان، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۲۵ ص.
- 3- نقشه زمین‌شناسی سیرجان، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، شماره ۱۱۱ (۱۹۹۵). سازمان زمین‌شناسی کشور.
- 4-Ahmadipour, H., Sabzehei, M., Hitechurch, H., Rastad, E., and Emami, M.H., (2003). Soghan complex as an evidence for leospreadig center and mantle diapirism in Sanandaj-Sirjan zone (south-east Iran). *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 14(2), 157-172 pp.
- 5-Arvin, M. and Robinson, P. T., (1994). The petrogenesis and tectonic setting of lava from Baft ophiolitic mélange, SW of Kerman/Iran. *Canad. J. Earth Sci.*, 31, 824-34 pp.
- 6-Barnes, S. J. and Roeder, P. L., (2001). The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of Petrology*, 42, 2279-2302 pp.
- 7-Bonatti E, and Michael, P. J., (1989). Mantle peridotites from continental rifts to ocean basins to subduction zones. *Earth Planet Sci Lett*, 91, 297-311 pp.
- 8-Bonavia, F.F., Diella, V., Ferrario, A., (1993). Precambrian podiform chromitites from Kenticha Hill Southern Ethiopia. *Econ. Geol.*, 88, 198-202 pp.
- 9-Dick, H. J. B. and Bullen, T., (1984). Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86(1), 54-76 pp.
- 10-Edwards, S. J. and Malpas, J., (1995). Multiple origins for mantle harzburgites: examples from Lewis Hills, Bay of Islands ophiolite, Newfoundland. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 32, 1046-1057 pp.
- 11-Gahlan, H. A., Arai, S., Ahmed, A. H., Ishida, Y., Abdel-Aziz, Y. M. and Rahimi, A., (2006). Origin of magnetite veins in serpentinite from the Late Proterozoic Bou-Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco: An implication for mobility of iron during serpentinization. *Journal of African Earth Sciences*, 46, 318-330 pp.
- 12-González-Mancera, G., Ortega-Gutiérrez, F., Proenza, J. A. and Atudorei, V., (2009). Petrology and geochemistry of Tehuiztzingo serpentinites (Acatlán Complex, SW Mexico). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(3), 419-435 pp.
- 13-Haggerty, S. E., (1991). Oxide mineralogy of the upper mantle. In: DH Lindsley (ed) *Oxide minerals: petrologic and magnetic significance*. *Rev Mineral*, 25, 355-416 pp.
- 14-Jan, M.Q. and Windley, B.F., (1990). Chromian spinel-silicate chemistry in ultramafic rocks of the Jijal complex Northwestern Pakistan. *Journal of Petrology*, 34, 667-715 pp.
- 15-Kamenetsky, V.S., Crawford, A.J. and Meffre, S., (2001). Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. *J. Petrol.*, 42, 655-671 pp.
- 16-Liipo, J., Vuollo, J., Nykänen, V., Piirainen, T., Pekkarinen, L. and Tuokko, I., (1995). Chromites from the early Proterozoic Outokumpu-Jormua ophiolite belt: a comparison with chromites from Mesozoic ophiolites. *Lithos*, 36, 15-27 pp.
- 17-Matsumoto, I. and Arai, S., (2001). Morphological and chemical variations of chromian spinel in dunite-harzburgite complexes from the Sangun zone (SW Japan): implications for mantle/melt reaction and chromitite formation processes. *Mineralogy and Petrology*, 73, 305-323 pp.