

زمین‌شناسی و کانی‌شناسی پگماتیت‌های جنوب مشهد با نگرشی ویژه بر کانی‌سازی لیتیم

پژواک دیدار^۱، نیما نظافتی^۲، محمدهاشم امامی^۳ و علی سلگی^۲

^۱دکتر، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
^۲استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
^۳دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اسلامشهر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۹

چکیده

گرانیت‌های جنوب مشهد به مساحت تقریبی ۴۰ کیلومتر مربع در استان خراسان رضوی قرار دارند. این به گرانیت‌ها از نوع S، پرآلومین و از نظر خاستگاه زمین‌ساخت ماگمایی از نوع برخوردی و کوهزایی هستند که میزبان پگماتیت‌هایی هستند که آنها را قطع کرده‌اند. در این نوشتار نتایج بررسی‌ها، روی پگماتیت‌های موجود در این گرانیت‌ها از نظر کانی‌سازی لیتیم پرداخته است. پگماتیت‌های جنوب مشهد که از نوع ساده (غیر پیچیده) هستند، ۷ رخساره پگماتیستی تشخیص داده شد که همگی این رخساره‌ها از نوع LCT (لیتیم-سزیم-تانتالیم) هستند. میکاهای این پگماتیت‌ها از نوع لیدولیت-مسکوویت و بیوتیت بوده که مقادیر Li در این میکاها بالاست و حدوداً به‌طور میانگین میان ۲۱۴۵ ppm تا ۵۷۴۵ متغیر است. گارنت‌های درون پگماتیت‌ها، از نوع آهن-منگنزدار (آلماندن-اسپارترین) است به رنگ سرخ-قهوه‌ای در نمونه دستی دیده می‌شوند. تورمالین‌های درون این پگماتیت‌ها بیشتر از نوع سری شورل-دراویت و البایت-شورل هستند که در نمونه دستی به رنگ تیره دیده می‌شوند. آپاتیت‌های این پگماتیت‌ها ریزدانه و از نوع هیدروکسی آپاتیت و به مقدار کمتر فلئور آپاتیت هستند. میانگین شاخص A/CNK در این پگماتیت‌ها، ۱/۳ تا ۱/۶ و میانگین نسبت Mg/Li، ۰/۸ الی ۱۰/۹ است. میانگین فراوانی مقادیر Li در این پگماتیت‌ها، ۹۶/۵ ppm در رخساره "کوارتز + تورمالین ± مسکوویت" و ۸۸۶ ppm در رخساره "کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لیدولیت + گارنت" است. با توجه به مطالعات صورت گرفته در سطح رخنمون‌ها، پگماتیت‌های مورد مطالعه دارای مقادیر کم Mg/Li، مقادیر بالای لیتیم و کانی‌سازی لیدولیت بوده و از نظر کانی‌زایی لیتیم، دارای پتانسیل مناسبی هستند.

کلیدواژه‌ها: پگماتیت، لیتیم، لیدولیت، گرانیت، جنوب مشهد.

*نویسنده مسؤل: پژواک دیدار

E-mail: pezhwakdidar@gmail.com

۱- پیش‌گفتار

امروزه نیاز صنعت به مواد خام در حال تغییر است ولی به‌طور کلی افزایش تقاضا برای موادی با خواص ویژه و تکنولوژی‌های پیشرفته (High-Technology)، لزوم ارزیابی دوباره دوره‌ای از منابع زمین‌شناسی، با توجه به تکنولوژی آینده از فلزات و کانی‌های Hi-Tech موجود در آنها را آشکار می‌سازد. به‌طور نسبی تجارت کوتاه مدت برای کالاهای منحصر بفرد نمی‌تواند مبنای بی‌نقصی برای اکتشافات زمین‌شناسی ارائه دهد. یکی از منابع کلاسیک از فلزات و کانی‌های Hi-Tech، گرانیت - پگماتیت‌ها هستند که از آنها عناصری همچون لیتیم به‌دست می‌آید. با وجود رقابت میان کانه‌زایی گرانیت‌ها و دیگر انواع کانسارهای کم عیار با حجم زیاد جدید، پگماتیت‌ها به‌طور قابل توجهی جایگاه خود را در میان منابع فلزی Hi-Tech، حفظ کرده‌اند.

لیتیم یکی از پر کاربردترین فلزات در صنایع مختلف از جمله پزشکی، داروسازی، الکترونیک، صنایع نظامی، خنک کننده‌های راکتورهای هسته‌ای، صنایع سرامیک، شیشه و آلیاژهای هوا فضا است. عمده‌ترین کانی‌های لیتیم عبارتند از: اسپودومن، آمبلیگونیت، لیدولیت و پتالیت که همگی آنها به‌دسته آلومینوسیلیکات‌ها تعلق دارند. گرانیت‌های نوع S بارور پرآلومین تولید پگماتیت‌های LCT (لیتیم-سزیم-تانتالیم) می‌کنند که از طریق ذوب بخشی از سنگ‌های پوسته میانی/بالایی تحت اولین آتاکسی به‌وجود می‌آیند و پگماتیت‌ها معمولاً زون‌بندی منطقه‌ای از خود نشان می‌دهند. این پگماتیت‌های نوع LCT، در بیشتر مناطق دارای غنی‌شدگی از عنصر لیتیم است و منابع مناسبی برای استخراج و بهره‌برداری از عنصر لیتیم هستند (Černý, 1989a).

پگماتیت‌ها از نظر کانی‌شناسی دارای دو نوع همگن و ناهمگن هستند که پگماتیت‌های همگن، به استثنای برخی جاها که از نظر Li، فلدسپار یا میکا مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، ارزش اقتصادی چندانی ندارند (Gilbert & Park, 1997). نظر به این که تا کنون مطالعه فراگیری به‌صورت مشخص روی پگماتیت‌های جنوب مشهد با توجه به کانی‌زایی لیتیم در آنها صورت نگرفته است بنابراین این

مقاله به بررسی زمین‌شناسی و کانی‌شناسی پگماتیت‌های جنوب مشهد با توجه ویژه به کانه‌زایی لیتیم در آنها می‌پردازد.

۲- زمین‌شناسی صحرایی

گستره مورد مطالعه به مساحت تقریبی ۴۰ کیلومتر مربع، در بر گه ۱:۱۰۰۰۰۰ مشهد در بخش جنوبی شهر مشهد میان طول و عرض جغرافیایی ۳۲° ۵۹' و ۴۶° ۵۹' و ۰۰' ۳۶" تا ۳۶° ۱۳' ۶۳" شمالی قرار دارد (شکل ۱). این محدوده از جنوب مشهد شروع شده و در امتداد جاده نیشابور به‌سوی جنوب ادامه دارد که به‌شکل یک چهار گوش در روی نقشه (شکل ۱) ملاحظه می‌شود. با توجه به مطالعات پیشین توسط Majidi (1978)، میرنژاد (۱۳۷۰)، طاهری و قائمی (۱۳۷۳)، ولی‌زاده و کریم‌پور (۱۳۷۴)، دیدار (۱۳۸۲)، کریم‌پور و همکاران (۱۳۹۰) و Karimpour et al. (2009) گرانیت‌های منطقه به‌سه گروه gr^1 ، gr^2 ، gr^3 تقسیم می‌شوند. گرانیت‌های gr^1 از نوع گرانیت‌های تیره‌رنگ (ملانوکرآت) بیوتیت‌دار هستند که رستیت‌های تیره رنگی با روند‌های N35 در آنها دیده می‌شوند. این گرانیت‌ها به لحاظ شیمیایی گرانیت نوع S، کالک‌آلکانل و فوق اشباع از آلومینیم هستند (دیدار، ۱۳۸۲؛ Karimpour et al., 2009). بر پایه سن سنجی به‌روش U-Pb در کانی زیرکن سن این گرانیت‌ها تریاس بالایی (۲۱۰ میلیون سال) است (Karimpour et al., 2009). گرانیت‌های gr^2 ، روشن‌تر از گرانیت‌های gr^1 است و در آنها بیوتیت کمتر دیده می‌شود، همچنین در آنها رستیت‌های تیره جهت‌دار نیز دیده نمی‌شود. این گرانیت‌ها از نظر سنی جوان‌تر از گرانیت‌های gr^1 هستند و هم‌زمان با فاز کوهزایی سیمربین نفوذ کرده‌اند. این گرانیت‌ها از نوع S و کالک‌آلکانل هستند و ماگمای این توده‌ها از ژرفای کمتر پوسته قاره‌ای منشأ گرفته‌اند. (ولی‌زاده و کریم‌پور، ۱۳۷۴). گرانیت - پگماتیت‌های gr^3 بیشتر شامل مونزوگرانیت‌های ارتوکلادار درشت‌دانه و گرانیت - پگماتیت‌ها و سنگ‌های در حال گرانیتیزاسیون هستند که بافت سنگ

- ۴- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتو کلاز + میکرو کلین) + پلاژیو کلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین + گارنت
- ۵- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتو کلاز + میکرو کلین) + پلاژیو کلاز + مسکوویت + لپیدولیت + گارنت
- ۶- کوارتز + تورمالین ± مسکوویت
- ۷- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتو کلاز + میکرو کلین) + پلاژیو کلاز + مسکوویت + بریل

بافت رخساره‌های بالا همه پگماتوئیدی و پورفیریتیک بوده و در همه رخساره‌ها به استثنای رخساره ۶ بافت میرمیکیتی و پرتیتی (زمینه فلدسپار پتاسیک همراه با رگه‌های پلاژیو کلاز در آن) دیده می‌شود (شکل ۲).

در رخساره‌هایی که بیوتیت دیده می‌شود (رخساره‌های شماره ۱ و ۲) این بیوتیت در حال دگرسانی به کلریت و مسکوویت است (شکل ۳) و بنابراین مسکوویت موجود دارای دو نسل مسکوویت‌های اولیه و ثانویه (حاصل دگرسانی) است. در رخساره شماره ۲ بیوتیت‌ها بر اثر متاسوماتیزم بردار به تورمالین (تورمالینزاسیون) تبدیل شده‌اند. در همه رخساره‌ها (به استثنای شماره ۶) میکرو کلین‌ها غیر آتره هستند ولی ارتو کلازها تا حدودی سرسیتی شده‌اند (شکل ۴). در این رخساره‌ها آپاتیت نیز دیده می‌شود. پلاژیو کلازها از نوع سدیک بوده که تا حدودی سرسیتی و سوسوریتی شده‌اند.

۴- ژئوشیمی کانی‌ها

به منظور مطالعه ژئوشیمیایی کانی‌های پگماتیتهای ۲۵ نمونه از کانی‌های فلدسپار و میکا برای تجزیه ICP-OES و ICP-MS و ۷۷ نمونه از نمونه‌های سنگی پگماتیتهای و گرانیتی نیز برای مطالعات ژئوشیمی به آزمایشگاه‌های مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور ارسال شد. به منظور مطالعه کانی‌شناسی، ۸۶ نمونه برای تجزیه XRD و ۲۰ نمونه برای بررسی نقطه‌ای SEM نیز به آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور ارسال شد. در پایان پس از انجام تجزیه‌های مربوط با استفاده از داده‌های به دست آمده و نرم‌افزارهای رایانه‌ای، نمودارهای ژئوشیمیایی مختلف رسم و تحلیل شد. تبلور یک مذاب گرانیتی و تفریق آن سبب غنی شدن کانی‌ها از عناصر کمیاب (همانند Li, B, Be, Rb, Cs, Nb, Ta, Mn, F) می‌شود (Černý, 1989a). به عنوان مثال، فلدسپار پتاسیک و مسکوویت از روییدیم و سزیم غنی می‌شوند، گارنت از منگنز و آپاتیت از F غنی می‌شود. افزایش تفریق نیز در تبلور کانی‌های دارای Be, B, Li, Ta و Cs مؤثر است (Černý, 1989a).

همان‌گونه که در بخش‌های پیش بیان شد پگماتیت‌های منطقه دارای کانی‌های اصلی کوارتز، فلدسپار پتاسیک، پلاژیو کلاز، میکا، گارنت و تورمالین هستند که بر پایه حضور، نبود و یا فراوانی برخی از این کانی‌ها انواع مختلفی از رخساره‌های پگماتیتهای در منطقه طبقه‌بندی شدند.

از آنجایی که برخی از این کانی‌های اصلی نقش مهمی در کانه‌زایی و طبقه‌بندی این پگماتیت‌ها دارند بنابراین در ادامه به شرح برخی از کانی‌های شاخص که برای شناسایی پگماتیت‌های نوع عناصر کمیاب (Rare-Earth Pegmatites) مورد استفاده قرار می‌گیرند، پرداخته می‌شود.

۵- فلدسپارها

بررسی فلدسپارهای پتاسیک درشت‌بلور یک ابزار اکتشافی بسیار عالی است زیرا که این کانی در گرانیت بارور و پگماتیت‌های نوع عناصر کمیاب بارور دیده می‌شود (Černý et al., 1981).

فلدسپارهای پتاسیک متمایل به صورتی و متوسط‌دانه درون گرانیت‌های نابارور

مادر اولیه در آنها نمایان است. همچنین رستیت‌هایی به صورت پراکنده و با ابعاد بزرگ در تمام این گرانیت - پگماتیت‌ها دیده می‌شوند. این گرانیت - پگماتیت‌ها تمام بلورین، درشت‌دانه و به رنگ صورتی روشن (به علت حضور ارتو کلازهای درشت بلورصورتی) و از نظر شیمیایی فوق آلوئین و از نوع S کالک آلکالین هستند (دیدار، ۱۳۸۲ و کریم‌پور و همکاران، ۱۳۹۰). سن این گرانیت‌ها با استفاده از روش U-Pb زیرکن، تریاس بالایی (۴/۱ ± ۲۰۵/۹ Ma) تعیین شده است (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۹۰).

پگماتیت‌های جنوب مشهد در درون گرانیت‌ها منطقه قرار گرفته و آنها را قطع می‌نمایند. این پگماتیت‌ها، همگن و از نظر کانی‌شناسی ساده و فاقد منطقه‌بندی هستند. آنها عمدتاً از بلورهای درشت کوارتز و فلدسپار با مقداری میکا تشکیل شده‌اند و معمولاً از نظر ترکیب و بافت، از یک دیواره تا دیواره دیگر یکنواخت هستند. این پگماتیت‌ها به صورت ضربدری همدیگر را قطع می‌کنند (شکل ۱). این رگه‌های پگماتیتهای دارای دو روند اصلی شمال خاور - جنوب باختر (N30) و شمال باختر - جنوب خاور (N120) هستند. شیب رگه‌های پگماتیتهای در برخی از مناطق حدود ۴۵ تا ۹۰ درجه است. پهنای این رگه‌های پگماتیتهای متفاوت است و از ۱۰ سانتی‌متر تا ۱۵۰ متر متغیر هستند. بیشترین تراکم و فراوانی این پگماتیت‌ها در گرانیت‌های gr^3 و gr^2 و کمترین فراوانی آنها در گرانیت‌های gr^1 است (این پگماتیت‌ها در گرانیت‌های gr^3 دارای بیشترین تراکم است به گونه‌ای که گرانیت‌های gr^3 را باید با نام گرانیت - پگماتیت معرفی کرد). در گرانیت‌های gr^1 با حرکت از شمال به سوی جنوب و دورتر شدن از گرانیت gr^2 این فراوانی کمتر هم می‌شود، به گونه‌ای که در حاشیه‌های جنوبی این گرانیت‌ها، تراکم پگماتیت‌ها بسیار کم شده و به سوی نبود پگماتیت‌ها پیش می‌رود. در حاشیه شمالی گرانیت‌های gr^2 نیز تراکم پگماتیت‌ها نسبت به مرکز و جنوب این گرانیت‌ها کمتر است. از نظر پهنای عریض‌ترین پگماتیت‌ها در مرکز و جنوب گرانیت‌های gr^2 و درون پگماتیت - گرانیت‌های gr^3 دیده می‌شوند و هر چه به حاشیه جنوبی و شمالی کل توده گرانیتی gr^1 و gr^2 نزدیک می‌شویم عرض این پگماتیت‌ها کمتر می‌شوند.

این پگماتیت‌ها از نظر ترکیب کانی‌شناسی (در نمونه‌های دستی) شامل ۷ رخساره متفاوت هستند که عبارتند از:

- فلدسپار (صورتی - سفید رنگ) + کوارتز + میکا (کتابی شکل یا پرمانند)
- فلدسپار (صورتی رنگ) + کوارتز
- فلدسپار (سفید یا صورتی رنگ) + کوارتز - میکا (کتابی شکل) + تورمالین سیاه (میله ای شکل یا شعاعی)
- فلدسپار (صورتی رنگ) + کوارتز + میکا (کتابی شکل) + تورمالین سیاه (میله‌ای شکل) + گارنت قرمز - قهوه‌ای
- فلدسپار (سفید تا صورتی رنگ) + کوارتز + میکا (کتابی شکل) + گارنت قرمز - قهوه‌ای
- فلدسپار (صورتی رنگ) + کوارتز + میکا (کتابی شکل) + بریل سبز - آبی رنگ
- کوارتز + تورمالین سیاه

۳- سنگ‌نگاری

پگماتیت‌های منطقه را با توجه به مطالعات سنگ‌نگاری می‌توان به ۷ رخساره زیر رده‌بندی کرد:

- ۱- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتو کلاز + میکرو کلین) + پلاژیو کلاز + مسکوویت + لپیدولیت + بیوتیت
- ۲- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتو کلاز + میکرو کلین) + پلاژیو کلاز + مسکوویت + لپیدولیت + بیوتیت + تورمالین
- ۳- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتو کلاز + میکرو کلین) + پلاژیو کلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین

حالی که مسکوویت در گرانت‌ها و پگماتیت‌های بارور دارای تمایل به رنگ سبز و درشت دانه (بیشتر از ۲ سانتی‌متر در طول و عرض) هستند. مسکوویت‌های سبز معمولاً دارای یک ترکیب مسکوویت لیتیم دار (Lithian = مسکوویت لیتیم دار که دارای منگنز ۳ ظرفیتی و آهن دو ظرفیتی در غیاب آهن سه ظرفیتی است) هستند. در پگماتیت‌های بسیار تفریق یافته، مسکوویت سبز ممکن است دارای هاله نازکی از لپیدولیت باشد. با افزایش تفریق، ترکیب میکای سبز لیتیم دار (Lithian) به لپیدولیت بنفش تغییر خواهد کرد (Černý, 1989a).

همه میکاها و مسکوویت‌های درون پگماتیت‌های منطقه به رنگ سفید - نقره‌ای تا سبز کم‌رنگ بوده و به شکل‌های مختلفی از جمله شعاعی، دم چلچله‌ای، میله‌ای و کتابی کوچک اندازه (زیر ۲ سانتی‌متر در طول و عرض) دیده می‌شوند. با توجه به نتایج مطالعات XRD میکاهای این پگماتیت‌ها از نوع مسکوویت و لپیدولیت است که این دو میکا هم‌زمان با هم در این پگماتیت‌ها دیده می‌شوند (البته در ۲ رخساره شماره ۱ و ۲ بیوتیت هم دیده می‌شود).

۵ عنصر کلیدی در تجزیه و تحلیل نمونه‌های درشت مسکوویتی عبارتند از لیتیم، پتاسیم، روبیدیم، سزیم و تانتالیم. بالا رفتن مقادیر لیتیم، روبیدیم و سزیم نشان‌دهنده این است که مسکوویت از پگماتیت نوع عناصر کمیاب حاصل آمده است. مقادیر لیتیم برای مسکوویت درون گرانت‌ها بارور بیش از ۲۰۰ ppm است در حالی که مقادیر لیتیم مسکوویت‌های پگماتیت‌های اسپودومن دار معمولاً بیش از ۱۰۰۰ ppm است (که این مقدار در پگماتیت‌های نوع لپیدولیت دار کمتر است) (Černý, 1989a). بسیاری از پگماتیت‌های نوع عناصر کمیاب با پتانسیل اقتصادی، دارای مقادیر بالایی از لپیدولیت اولیه و بیوتیت‌هایی با هاله‌های متاسوماتیکی غنی از لیتیم، روبیدیم و سزیم هستند، که زمانی متبلور شده‌اند که مایعات پگماتیته به سنگ میزبان مهاجرت کرده‌اند (Černý, 1989a).

همان‌گونه که در جدول ۲ نیز مشخص است میزان میانگین لیتیم در میکاهای درون رخساره «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + بیوتیت» در حدود ۵۷۴۵ ppm بوده و در رخساره «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین» این میانگین نزدیک به ۲۱۴۵ ppm است.

۷- تورمالین

کانی تورمالین شاخص بسیار عالی برای اکتشاف پگماتیت‌های بارور است زیرا که تغییرات رنگ و ترکیب در آن با افزایش تفریق تغییر می‌کند به گونه‌ای که گرانت‌ها بارور دارای تورمالین غنی از آهن سیاه رنگ (شورل) است و زون‌های درونی‌تر از پگماتیت‌های نوع عناصر کمیاب ممکن است دارای تورمالین صورتی، سبز و آبی غنی از لیتیم (البائیت) باشند. شورل سیاه رایج‌ترین گونه از تورمالین در پگماتیت‌ها و گرانت‌های بارور است. همان‌گونه که یک مذب پگماتیته متبلور می‌شود، از آهن رقیق و از لیتیم غنی می‌شود و ترکیب تورمالین تغییر کرده و از شورل به سوی البائیت می‌رود. اگر یک مذب تشکیل دهنده پگماتیت قادر به تبلور البائیت باشد به احتمال زیاد از دیگر عناصر کمیاب، همانند روبیدیم، سزیم یا تانتالیم غنی است (London, 1999).

حضور تورمالین صورتی، سبز و یا آبی غنی از لیتیم نشان می‌دهد که پگماتیت دارای پتانسیل اقتصادی است اگر چه همه پگماتیت‌های دارای کانه‌زایی تانتالیم این گونه نیستند. بالا رفتن مقادیر کلسیم یا منیزیم در تورمالین در پگماتیت‌ها به احتمال زیاد نشان‌دهنده آلودگی مذب‌های گرانتی توسط یک سنگ میزبان غنی از کلسیم و منیزیم (معمولاً سنگ‌های مافیک متاولکانیک) است.

به باور London et al. (1996) و London (1999) آلودگی توده‌های گرانتی و خارجی‌ترین زون‌های پگماتیته با منیزیم از طریق سنگ میزبان این توده‌ها

دیده می‌شوند در حالی که فلدسپارهای پتاسیک درون پگماتیت‌های پتاسیک و پگماتیت‌های نوع عناصر کمیاب مایل به سفید و درشت‌دانه (اندازه بیش از ۵ سانتی‌متر) هستند. هم‌رشدی گرافیکی فلدسپار پتاسیک و کوارتز در گرانت‌ها و پگماتیت‌های بارور رایج است (Černý, 1989a). در کل می‌توان رنگ فلدسپارهای انواع رخساره‌های پگماتیته منطقه را به صورت زیر بیان کرد.

- رخساره‌های «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + بیوتیت»، «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + گارنت» و «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + بیوتیت + تورمالین» دارای فلدسپار عمدتاً صورتی درشت دانه هستند. - رخساره‌های «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + گارنت + تورمالین» و «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین» به‌طور عمده دارای فلدسپارهای سفید رنگ متوسط بلور هستند. البته گفتنی است که در برخی مناطق، پگماتیت‌های با رخساره «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + گارنت» و رخساره «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + بیوتیت» دارای فلدسپارهای سفید رنگ و در برخی موارد درشت بلور هستند که البته فراوانی آنها نسبت به کل پگماتیت‌های رخساره باشد، کم است.

رخساره «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین» نیز در برخی از نقاط دارای فلدسپارهای با رنگ صورتی و درشت دانه است، که در این جا نیز فراوانی آنها نسبت به کل تعداد انواع پگماتیت‌ها با فلدسپار سفید کم است. با توجه به مطالعات صورت گرفته با روش‌های مطالعه مقاطع نازک، XRD و SEM، فلدسپارهای پتاسیک درون پگماتیت‌های منطقه از نوع میکروکلین و ارتوکلاز و پلاژیوکلازها نیز از نوع آلپیت هستند.

نمودار K/Rb در برابر Cs برای فلدسپارهای پتاسیک یکی از نمودارهای استاندارد برای ارزیابی درجه تفریق پگماتیت است (Černý, 1989a). اندازه‌گیری نسبت K/Rb برای تعیین درجه جایگزینی روبیدیم به جای پتاسیم در ساختار بلوری فلدسپار پتاسیک است (جدول ۱).

در نمودار K/Rb-Cs ارائه شده توسط Černý (1989) برای تعیین پتانسیل اقتصادی پگماتیت‌ها برای عناصر بریلیم، بریلیم-تانتالیم و لیتیم-سزیم-بریلیم-تانتالیم، همان‌گونه که دیده می‌شود تنها برخی از نمونه‌های فلدسپاری رخساره‌های «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + گارنت» و «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + بیوتیت» که از نظر سزیم دارای بیشترین مقادیر بودند در محدوده کانه‌زایی بریلیم واقع شده و ارزش اقتصادی دارند و بقیه نمونه‌ها در محدوده عقیم از این عناصر واقع شده‌اند (شکل ۵).

۶- میکاها

بررسی نمونه مسکوویت‌های کتابی شکل (Muscovite books)، یک ابزار اکتشافی بسیار عالی است زیرا که آنها در هر دو گرانت‌ها بارور و پگماتیت‌های عناصر کمیاب ظاهر می‌شوند و آن را به‌عنوان یک شاخص بسیار خوب برای کانه‌زایی تانتالیم می‌دانند (Gordiyenko, 1971; Černý, 1989a; Morteani & Gaupp, 1989). این روش محدود به مسکوویت‌های کتابی شکل درشت می‌شود که ممکن است این مسکوویت‌ها در گرانت‌های عقیم دیده نشوند.

رنگ و اندازه دانه‌های مسکوویت با افزایش تفریق تغییر می‌کند (Černý, 1989a)، مسکوویت‌های گرانت‌های عقیم دارای گرایش به نقره‌ای و دانه متوسط هستند در

گارنت اسپسارترین مشخصه‌ای از زون جایگزینی و زون هسته‌ای غنی از کوارتز در پگماتیت‌های دارای کانی‌های لیتیم‌دار مانند اسپودومن، لپیدولیت، پتالیت و آمیلیگونیت است (Baldwin & von Knorring, 1983). گارنت‌های درون رخساره‌های پگماتیتهی منطقه جنوب مشهد از دو نوع سرخ و قهوه‌ای هستند که اندازه آنها در مناطق مختلف متفاوت است و قطر آنها از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر می‌رسد که فراوانی گارنت‌های با قطر چند میلی‌متر بیشتر است. گارنت‌های سرخ رنگ که به‌طور عمده ریزدانه هستند، بسیار شفاف و غیر دگرسان هستند ولی گارنت‌های قهوه‌ای نیمه شفاف تا مات و مقداری نیز دگرسان شده و شکننده هستند. قطر این دانه‌های گارنت به حد چند سانتی‌متر می‌رسد و درشت‌تر از گارنت‌های سرخ هستند.

با توجه به مطالعه نقطه‌ای با روش SEM، گارنت‌های منطقه از نوع آهن-منگنزدار (آلماندین - اسپسارترین) هستند که هیچ‌گونه زون‌بندی در آن دیده نمی‌شود (شکل ۷) که این مطلب با نمودارهای $Mg, (Ca \times 10) - Mn - Fe$ در برابر $Mn/(Mn+Fe^{2+})$ و Ca در برابر $Mn/(Mn+Fe^{2+})$ تأیید می‌شود. در نمودارهای Mg در برابر $Mn/(Mn+Fe^{2+})$ و Ca در برابر $Mn/(Mn+Fe^{2+})$ همه گارنت‌های منطقه در محدوده آلماندین - اسپسارترین (آهن - منگنز) دار قرار گرفته‌اند و همان‌گونه که مشخص است میزان منیزیم و کلسیم این گارنت‌ها بسیار پایین و در حد صفر است، بدین ترتیب این گارنت‌ها و در نتیجه پگماتیت‌ها، تفریق یافتگی به نسبت متوسطی داشته و با سنگ‌های مافیک پیرامون آلودگی نشان نمی‌دهند (شکل ۸).

۹- آپاتیت

حضور فلئوئورآپاتیت ($Ca_3(PO_4)_3(F)$) آبی یا سبز در گرانیت، پگماتیت یا آپاتیت نشان می‌دهد که تبلور از مذابی غنی از فلئوئور - فسفر صورت گرفته است. اگر چنین مذابی تفریق حاصل نماید ممکن است مقادیر منگنز در فلئوئورآپاتیت بالا رود (برای مثال، بیش از ۲٪ وزنی MnO) و در پگماتیت نوع عنصر کمیاب تمرکز یابد (Černý, 1989a).

برخی از پگماتیت‌ها فلئوئورآپاتیت‌های فقیر از منگنز تولید می‌کنند که دلیل آن، عدم جدایش ترجیحی و تمایل منگنز به گارنت یا کانی‌های اکسیدی بیش از فلئوئورآپاتیت در طی تبلور است. برای مثال پگماتیت نوع اسپودومن McCombe، اونتاریو-کانادا دارای فلئوئورآپاتیت با بیش از ۰/۸ درصد وزنی MnO همراه با گارنت غنی از منگنز و کانی‌های اکسیدی (اسپسارترین و منگنوتیتانیت) در آن است (Černý, 1989a).

حضور فلئوئورآپاتیت سبز یا آبی همراه با سنگ غنی از منگنز نشان می‌دهد که پگماتیت دارای پتانسیل اقتصادی است، اگرچه همه پگماتیت‌های دارای کانه‌زایی دارای فلئوئورآپاتیت غنی از منگنز نیستند (Černý, 1989a).

در همه رخساره‌های پگماتیتهی منطقه مورد مطالعه به‌جز رخساره «کوارتز + تورمالین ± مسکوویت»، کانی آپاتیت به‌صورت منشوری و چند ضلعی وجود دارد که این کانی‌های آپاتیتهی به‌صورت خود شکل یا نیمه خود شکل در سنگ‌های پگماتیتهی دیده می‌شوند. فراوانی این آپاتیت‌ها در مقاطع نازک، کم است و به‌صورت یک کانی فرعی در سنگ دیده می‌شوند. با توجه به مطالعات تجزیه نقطه‌ای با روش SEM این آپاتیت‌ها به‌طور عمده از نوع هیدروکسی آپاتیت و به مقدار کمتر فلئوئورآپاتیت هستند (شکل ۹).

۱۰- ژئوشیمی توده‌های پگماتیتهی

همان‌گونه که بیان شد گرانیت‌های میزبان پگماتیت‌های منطقه، کالک آلکالن و از نوع S است و میزان آلومین در آنها بالاست. همچنین پگماتیت‌های جنوب مشهد (۷ رخساره) با توجه به تجزیه شیمیایی ۱۰۰ نمونه، پرآلومین است و نسبت آلومینیم به عناصر آلکالی در آنها بیشتر از یک است $(A/CNK=1.3-1.6)$ (جدول ۳).

به‌طور کلی نشانه خوبی برای اقتصادی بودن پگماتیت‌ها نیست، اگر چه ممکن است مناطق درونی‌تر توده پگماتیتهی اقتصادی باشند. برای مثال، تورمالین در زون‌های مرزی پگماتیت‌های Tanco در مونتوبا-کانادا، شورل سیاه رنگ غنی از کلسیم و منیزیم است ولی در زون‌های تفریق یافته‌تر البائیت صورتی رنگ است (Selway et al., 2000) در پگماتیت‌های منطقه تنها برخی از رخساره‌ها دارای تورمالین هستند که عبارتند از:

- رخساره کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین
- رخساره کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین + گارنت
- رخساره کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین + بیوتیت
- رخساره کوارتز + تورمالین ± مسکوویت

مابقی رخساره‌های درون پگماتیت‌های منطقه فاقد تورمالین هستند. تورمالین‌های همه رخساره‌هایی که دارای تورمالین هستند با توجه به نتایج تجزیه XRD، همه سیاه رنگ (از سری درایت-شورل و البائیت-شورل) است و به‌صورت میله‌ای و شعاعی دیده می‌شوند که فراوانی آنها در مناطق مختلف متفاوت است. برای مثال در رخساره کوارتز + تورمالین ± مسکوویت مقدار این تورمالین به قدری زیاد است که تورمالین به‌رنگ سیاه به‌همراه کوارتز با اندازه‌های درشت به‌صورت یک کانی مجزا در سنگ دیده می‌شود. با توجه به نتایج تجزیه XRD تورمالین‌های رخساره «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + بیوتیت + تورمالین» از نوع یوویت (Uvite) است که حاصل دگرسانی پنوماتولیتی پلاژیوکلاز و بیوتیت به تورمالین نوع کلسیم و منیزیم‌دار (یوویت) با ترکیب شیمیایی $(CaMg_3(Al_3Mg)Si_6O_{18}(BO_3)_3(OH)_4)$ است که به‌رنگ سیاه تا سبز یا قهوه‌ای مایل به سیاه دیده می‌شود.

تورمالین‌های رخساره «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین + گارنت» با توجه به تجزیه XRD از دو نوع البائیت (Elbaite) با فرمول شیمیایی $(Na(Li_{1.5}Al_{1.5})Al_6Si_6O_{18}(BO_3)_3(OH)_4)$ به‌رنگ سبز تیره مایل سیاه و درایت (Dravite) با فرمول شیمیایی $(NaMg_3Al_3Si_6O_{18}(BO_3)_3(OH)_4)$ و با رنگ قهوه‌ای تیره مایل سیاه است.

طبق تجزیه XRD تورمالین‌های رخساره‌های «کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیوکلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین» و «کوارتز + تورمالین ± مسکوویت» از نوع شورل است.

بر پایه نتایج تجزیه ژئوشیمیایی منطقه بر نمودار $Al - Al_{50}Fe_{50} - Al_{30}Mg_{50}$ توسط Henry & Guidotti (1985) ارائه شده ترکیب کلی نمونه‌های تورمالینی درون هر یک از رخساره پگماتیتهی از نوع شورل، البائیت و تا حدودی درایت مشخص شده است (شکل ۶).

۸- گارنت

حضور کانی گارنت در یک گرانیت نشان می‌دهد که گرانیت پرآلومین و بارور است، در حالی که گرانیت عقیم از کانه‌زایی، فاقد گارنت است. گارنت به‌دلیل تغییر رنگ و ترکیب آن همراه با افزایش تفریق جزء به‌جزء مذاب گرانیتی یک ابزار اکتشافی عالی است (Černý, 1989a). گرانیت‌های بارور دارای گارنت قرمز غنی از آهن (آلماندین) و پگماتیت‌های نوع عناصر کمیاب دارای گارنت نارنجی غنی از منگنز (اسپسارترین) هستند. آلماندین سرخ معمول‌ترین گونه از گارنت در گرانیت‌های بارور و پگماتیت‌هاست. با کاهش نسبت Fe/Mn ، مقادیر آهن کاهش و مقادیر منگنز در گارنت‌ها در طی افزایش تفریق، در مذاب پگماتیتهی افزایش می‌یابد (Černý, 1989a; Whitworth, 1992).

شوری فلوریدی بالا + افزایش فشار HF در زیر گروه لپیدولیت سبب تفریق شدید در Fe-Mn می شود (Černý & Ercit, 1985; Černý, 1989a).

تفریق منگنز از آهن و غنی شدگی آن در مراحل پایانی تکامل پگماتیت به ویژه در پگماتیت های غنی از F مشخص است. به طور ویژه، گارنت غنی از Mn، کانی های فسفاتی و اکسیدهای Nb, Ta از ویژگی های زیر گروه لپیدولیت دار فعالیت بالا از آلکالی های فلوتوریدی هستند (Černý & Ercit, 1985; Černý et al., 1986; Černý, 1989a). با این حال در برخی موارد غنی شدگی در منگنز یکی از ویژگی های اصلی پگماتیت ها در نظر گرفته می شود که از یک والد غنی از Mn به ارث برده شده و یا از یک سنگ غنی از Mn هضم شده است (Harada et al., 1976).

گرانیت های جنوب مشهد از نوع پرآلومین (A/CNK=1.3-1.6) و از نوع S هستند. پگماتیت های درون گرانیت های جنوب مشهد از نوع همگن و فاقد منطقه بندی هستند که از نظر کانی شناسی و سنگ نگاری دارای ۷ رخساره زیر هستند:

- ۱- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتو کلاز + میکرو کلین) + پلاژیو کلاز + مسکوویت + لپیدولیت + بیوتیت
- ۲- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتو کلاز + میکرو کلین) + پلاژیو کلاز + مسکوویت + لپیدولیت + بیوتیت + تورمالین
- ۳- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتو کلاز + میکرو کلین) + پلاژیو کلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین
- ۴- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتو کلاز + میکرو کلین) + پلاژیو کلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین + گارنت
- ۵- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتو کلاز + میکرو کلین) + پلاژیو کلاز + مسکوویت + لپیدولیت + گارنت
- ۶- کوارتز + تورمالین ± مسکوویت
- ۷- کوارتز + فلدسپار پتاسیک (ارتو کلاز + میکرو کلین) + پلاژیو کلاز + مسکوویت + بریل

میکاهای این پگماتیت ها با توجه به نتایج تجزیه های XRD و تجزیه های ICP از نوع مسکوویت و لپیدولیت بوده و گارنت های درون این پگماتیت ها (رخساره هایی که دارای گارنت هستند) از نوع آلماندن - اسپسارترین هستند. با توجه به تجزیه های شیمی و بررسی های ژئوشیمیایی، این پگماتیت ها در برخی مناطق دارای غنی شدگی لیتیم در حد اقتصادی هستند. نسبت Mg/Li برای تجزیه توده سنگی (Bulk) که یکی از بهترین شاخص های تعیین درجه تفریق پگماتیت و گرانیت هاست، در بیشتر این رخساره های پگماتیتی در محدوده میان ۰/۲ تا ۱۰ است که با کاهش این نسبت بر میزان فراوانی لیتیم افزوده می شود. مقادیر لیتیم در بخش هایی از رخساره های پگماتیتی بالاتر از ۱۰۰۰ ppm بوده و در حد اقتصادی است. با توجه به این مطلب که مقادیر لیتیم با افزایش ژرفا افزایش می یابد (Galeschuk & Vanstone, 2007)، بنابراین پیشنهاد می شود برای تعیین دقیق میزان عیار لیتیم در انواع رخساره های پگماتیتی منطقه، به حفر گمانه و نمونه برداری های ژرفی اقدام شود.

این پگماتیت ها در رده بندی (1995) Černý در رده پگماتیت های نوع LCT (لیتیم - سزیم - تانتالیم) قرار می گیرند.

طبق نمودار ANK در برابر ANCK که توسط Maniar & Piccolli (1989) ارائه شده پگماتیت های منطقه به شدت پرآلومین هستند (شکل ۱۰).

نسبت Mg/Li حاصل از تجزیه توده ای سنگی (Bulk) یکی از بهترین شاخص های تعیین درجه تفریق پگماتیت و گرانیت هاست. افزایش تفریق در تبلور کانی های دارای Cs و Be, B, Li, Ta مؤثر است. بالا رفتن نسبت Mg/Li (برای مثال $Mg/Li > 50$) نشان دهنده فراوانی منیزیم در سنگ اولیه است، در حالی که نسبت پایین Mg/Li (برای مثال $Mg/Li < 10$) نشان دهنده بالا رفتن مقدار لیتیم در سنگ تفریق یافته است. سنگ های غنی از لیتیم دارای پتانسیل اقتصادی بیشتری از سنگ های فقیر از لیتیم هستند (Černý, 1989a).

میانگین نسبت Mg/Li در پگماتیت های منطقه از ۰/۸ تا ۱۰/۹ متغیر است که این مقدار در رخساره پگماتیتی "کوارتز + فلدسپار پتاسیک + پلاژیو کلاز + مسکوویت + لپیدولیت + تورمالین" به طور میانگین برابر ۰/۸، (کمترین مقدار) و در رخساره "کوارتز + تورمالین ± مسکوویت" برابر ۱۰/۹، (بیشترین مقدار) است (جدول ۴).

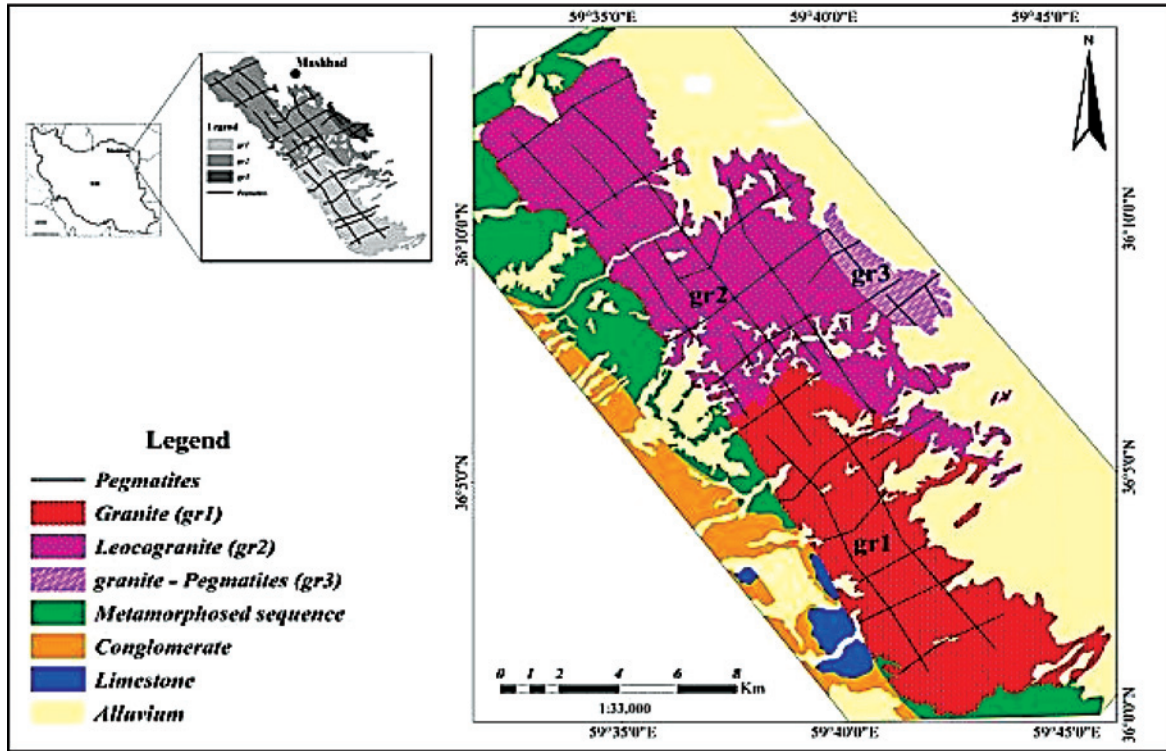
طبق نمودار Mg/Li در برابر Li، بیشتر رخساره های پگماتیتی در محدوده Mg/Li برابر ۰/۲ تا ۱۰ قرار می گیرند و هر چه از مقدار نسبت Mg/Li کمتر می شود بر مقدار لیتیم نیز افزوده می شود (شکل ۱۱).

در نمودار Rb/Sr در برابر Li با افزایش تفریق پگماتیت ها بر مقدار لیتیم آنها نیز افزوده شده و این روند یک روند افزایشی است (شکل ۱۲).

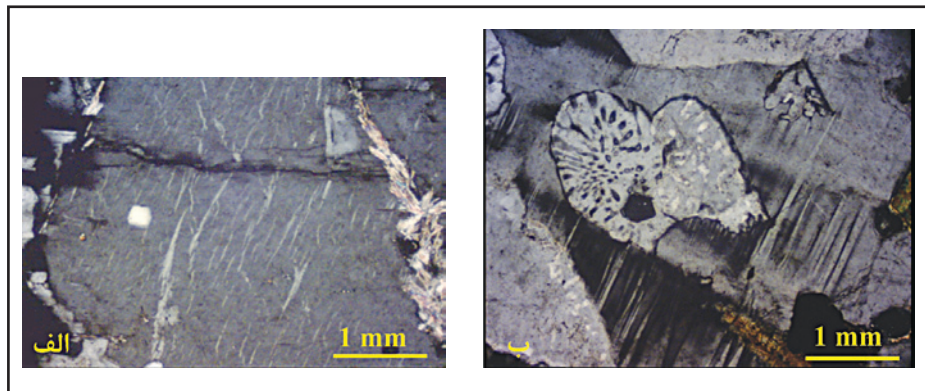
۱۱- بحث و نتیجه گیری

همان گونه که بیان شد پگماتیت های جنوب مشهد از نوع پرآلومین است و با توجه به مطالعات سیال های درگیر درون کوارتزهای این سنگ ها، ژرفای تشکیل این پگماتیت ها در فشار حدوداً ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ بار و درجه حرارت ۲۸۵ تا ۳۵۰ سانتی گراد است. با توجه به حضور کانی لپیدولیت و کانی های تورمالین از نوع شورل و البایت و گارنت های آلماندن و اسپسارترین، این پگماتیت ها غنی از لیتیم و منگنز هستند. این پگماتیت ها از نظر فراوانی عنصر فسفر (حضور کانی آپاتیت) و F (حضور کانی فلونور آپاتیت) در حد متوسط است (شکل ۱۳). بنابراین با توجه به مطالب بیان شده پگماتیت های جنوب مشهد از نوع پگماتیت های نوع LCT و مربوط به زیر شاخه پگماتیت های نوع مسکوویت - عناصر کمیاب لیتیم دار (Muscovite - Rare - element - Lithium یا MSREL-Li) هستند (Černý & Ercit, 2005).

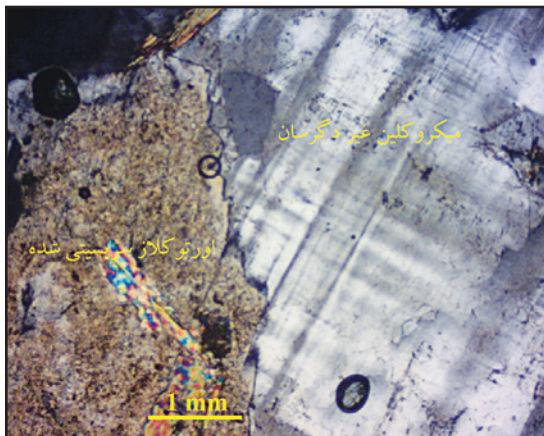
زیر گروه پگماتیت های لپیدولیت دار به نسبت گسترده هستند و توسط لپیدولیت به عنوان آلومینوسیلیکات لیتیم دار غیر غالب (یا منحصر بفرد) مشخص شده اند. لپیدولیت به وسیله فشار بالای KF و LiF در اسیدیته به نسبت کم تثبیت شده است. افزایش فشار HF سبب تثبیت لپیدولیت + توپاز می شود (London, 1982). با این حال



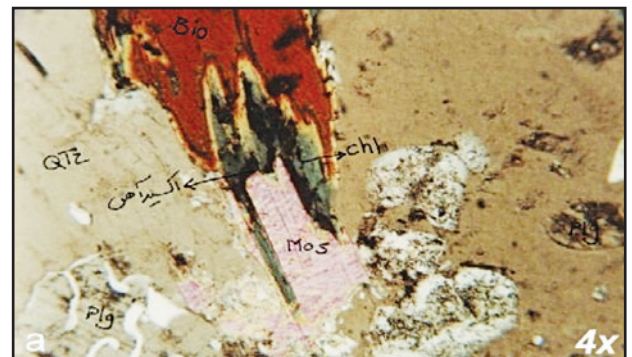
شکل ۱- موقعیت گرانیت‌ها و پگماتیت‌های جنوب مشهد (برگرفته از طاهری و قائمی، ۱۳۷۳).



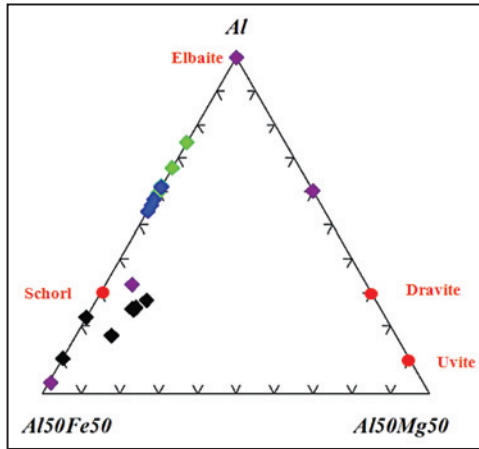
شکل ۲- الف) بافت پرتیت در ارتو کلاز؛ ب) بافت میرمیکیتی در ارتو کلاز در کنار میکروکلین.



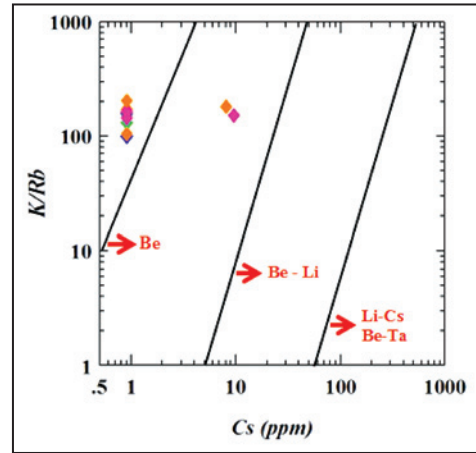
شکل ۴- دو نسل فلدسپار در پگماتیت‌های منطقه، میکروکلین‌های غیر دگرسان و ارتو کلازهای دگرسان شده.



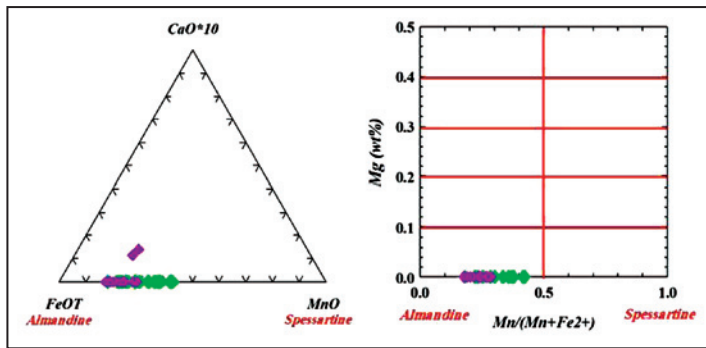
شکل ۳- تجزیه گرمایی بیوتیت به کلریت و مسکوویت = Mus = مسکوویت، Bio = بیوتیت و Chl = کلریت.



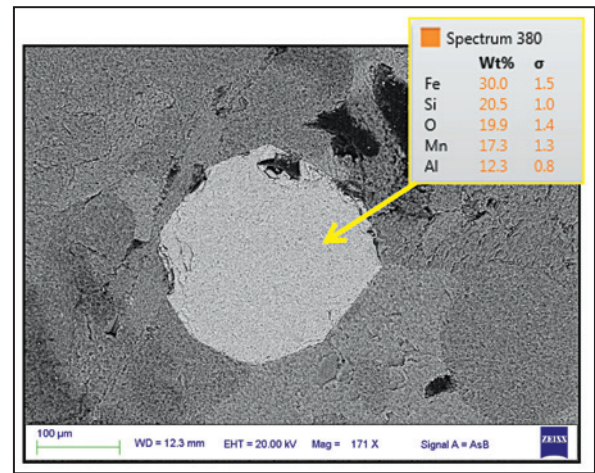
شکل ۶- نمودار $Al - Al_{50}Fe_{50} - Al_{50}Mg_{50}$ برای مشخص کردن ترکیب تورمالین‌های درون انواع رخساره‌های پگماتیتهای منطقه جنوب مشهد (Henry & Guidotti, 1985).



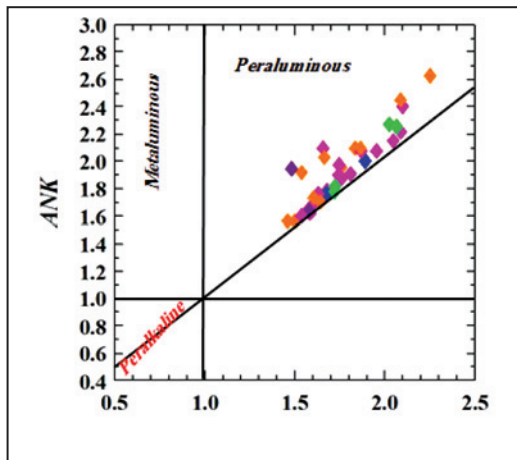
شکل ۵- نمودار K/Rb-Cs برای فلدسپارهای درون پگماتیتهای منطقه، برای تعیین پتانسیل اقتصادی پگماتیتهای (محدوده‌های کانزایی عناصر Be, Be-Li و Li-Cs-Ba-Ta ارائه شده توسط Černý, 1989).



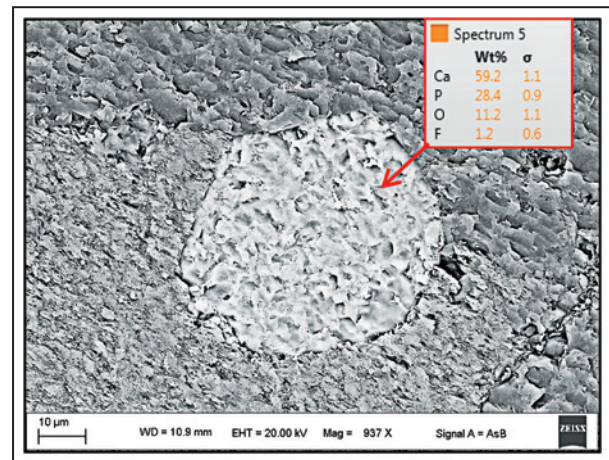
شکل ۸- الف) نمودار $(CaO \times 10) - MnO - FeO$ (Muller et al., 2009)؛ ب) نمودار Mg در برابر $Mn/(Mn+Fe^{2+})$ برای تعیین نوع گارنت‌های درون پگماتیتهای منطقه جنوب مشهد.



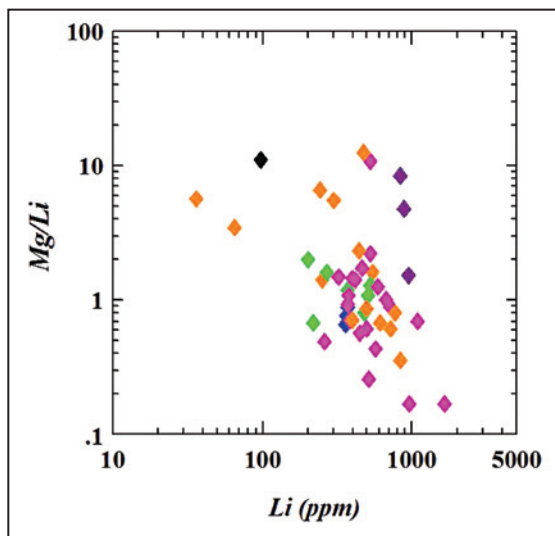
شکل ۷- نتایج تجزیه نقطه‌ای نمونه گارنت‌های درون پگماتیتهای منطقه با روش SEM، همان‌گونه که دیده می‌شود گارنت‌های منطقه از نوع آهن- منگنزدار (آلماندن- اسپسارتین) هستند.



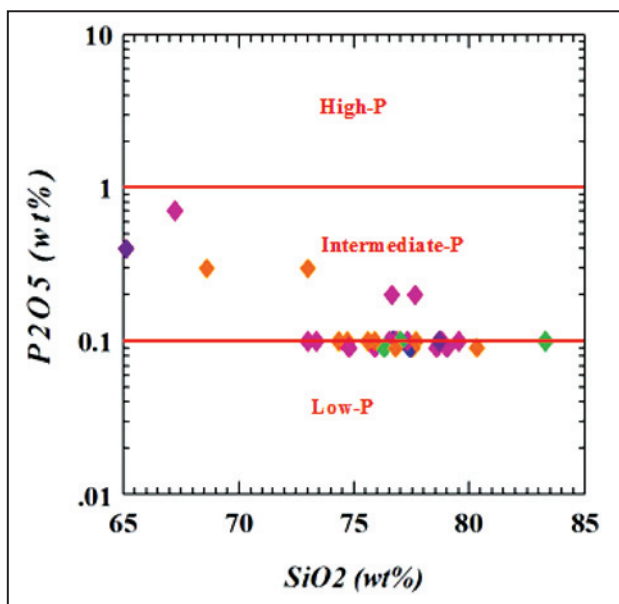
شکل ۱۰- نمودار ANK-ACNK برای سنگ‌های پگماتیتهای منطقه جنوب مشهد، باتوجه به این نمودار نمونه‌های پگماتیتهای منطقه از نوع به شدت پرآلومین هستند (Maniar & Piccolli, 1989).



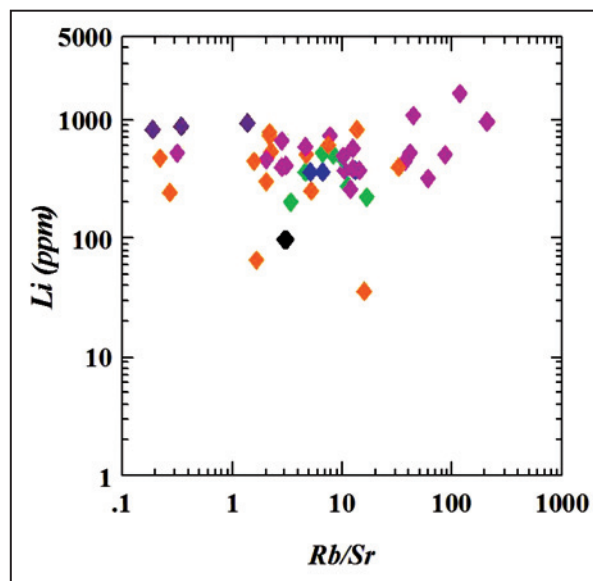
شکل ۹- نتایج تجزیه نقطه‌ای نمونه آپاتیت‌های درون پگماتیتهای منطقه با روش SEM، همان‌گونه که دیده می‌شود آپاتیت‌های منطقه از نوع فلونوردار (فلونورآپاتیت) هستند. (البته شایان ذکر است که آپاتیت‌های هیدروکسیل‌دار دارای فراوانی بیشتری نسبت به آپاتیت‌های فلونوردار در این سنگ‌ها هستند).



شکل ۱۱- نمودار Li - Mg/Li برای تعیین پتانسیل اقتصادی انواع رخساره‌های پگماتیتهی منطقه جنوب مشهد. با توجه به این نمودار، عمده رخساره‌های پگماتیتهی در محدوده Mg/Li برابر ۰/۲ تا ۱۰ قرار گرفته‌اند و هر چه از مقدار نسبت Mg/Li کمتر می‌شود بر مقدار لیتیم نیز افزوده می‌شود (Černý, 1989b).



شکل ۱۳- نمودار تغییرات P₂O₅ در برابر SiO₂ برای انواع رخساره‌های پگماتیتهی منطقه جنوب مشهد (Kuster, 2009).



شکل ۱۲- نمودار تغییرات Li - Rb/Sr برای انواع رخساره‌های پگماتیتهی منطقه جنوب مشهد. با افزایش مقادیر Rb/Sr (افزایش درجه تفریق)، مقدار Li افزایش می‌یابد (Černý & Meintzer, 1988).

جدول ۱- مقایسه میانگین عناصر K, Rb, Cs, Sr و نسبت‌های آنها در ترکیب فلدسپارهای انواع رخساره‌های پگماتیتهی منطقه جنوب مشهد (بر پایه نتایج تجزیه ICP).

Rb/Sr	Rb/Cs	K/Cs	K/Rb	Sr (ppm)	Cs (ppm)	Rb (ppm)	K (ppm)	نشانه	انواع رخساره های پگماتیتهی
۴۱	۷۱۶	۸۷۰۰۸	۱۲۶	۳۹/۶	۰/۹	۶۴۴/۵	۷۸۳۰۷	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio
۹	۴۱۷	۵۵۷۹۸	۱۳۴	۳۹/۸	۰/۹	۳۷۵/۵	۵۰۲۱۸	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio+Tour
۱۸	۸۷۸	۱۱۲۱۵۱	۱۲۹	۷۷/۴	۰/۹	۷۹۰/۲	۱۰۰۹۳۶	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour
۱۴	۸۳۲	۱۱۰۲۸۹	۱۳۳	۵۳	۰/۹	۷۴۸/۶	۹۹۲۶۰	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour+Gar
۱۵	۵۹۴	۹۲۸۲۴	۱۵۲	۸۶/۳	۱/۰۱	۵۶۲/۶	۸۵۲۶۲	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Gar
-	-	-	-	-	-	-	-	◆	Qtz+Tour±Mus

جدول ۲- مقایسه میانگین عناصر K, Rb, Cs, Li, Ta در ترکیب میکاهای انواع رخساره‌های پگماتیته منطقه جنوب مشهد (بر پایه نتایج تجزیه ICP).

Rb/Cs	K/Cs	K/Rb	Ta (ppm)	Li (ppm)	Cs (ppm)	Rb (ppm)	K (ppm)	نشانه	انواع رخساره های پگماتیته
۱۵۳	۱۵۳۴۱	۱۰۳	۲۲/۳	۵۷۴۵	۵	۷۶۲	۷۷۵۹۵	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio
-	-	-	-	-	-	-	-	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio+Tour
۳۶۹	۱۴۸۱۰	۴۰	۴۷/۸	۲۱۴۵	۳/۹	۱۴۳۰	۵۷۳۲۸	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour
-	-	-	-	-	-	-	-	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour+Gar
۱۹۱	۱۶۱۱۵	۸۷	۱۷/۷	۳۹۷۵	۴/۴	۸۷۶	۶۸۲۷۶	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Gar
-	-	-	-	-	-	-	-	◆	Qtz+Tour±Mus

جدول ۳- مقایسه میانگین عناصر K, Na, Ca, Al در ترکیب میکاهای انواع رخساره‌های پگماتیته منطقه جنوب مشهد (بر پایه نتایج تجزیه ICP).

Na ₂ O/K ₂ O	A/CNK	(%) Na ₂ O	(%) K ₂ O	CaO (%)	(%) Al ₂ O ₃	نشانه	انواع رخساره های پگماتیته
۱/۳	۱/۶	۵/۰	۵/۴	۱/۰	۱۳/۹	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio
۱/۰	۱/۶	۴/۷	۶/۲	۲/۴	۱۴/۷	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio+Tour
۰/۹	۱/۶	۴/۳	۴/۷	۰/۴	۱۵/۲	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour
۰/۹	۱/۴	۴/۳	۵/۳	۰/۵	۱۳/۹	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour+Gar
۱/۱	۱/۳	۴/۷	۵/۱	۰/۷	۱۳/۴	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Gar
۰/۶	۱/۴	۰/۲	۰/۱	۰/۰۲	۱/۶	◆	Qtz+Tour±Mus

جدول ۴- مقایسه میانگین عناصر Mg, Li, Sr, Rb در ترکیب میکاهای انواع رخساره‌های پگماتیته منطقه جنوب مشهد (بر پایه نتایج تجزیه ICP).

Rb/Sr	Mg/Li	Sr (ppm)	Rb (ppm)	Li (ppm)	Mg (ppm)	نشانه	انواع رخساره های پگماتیته
۴/۲	۲/۳	۱۶۶	۲۵۷	۴۴۱/۵	۱۰۲۵	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio
۳/۴	۴/۷	۵۷۱	۱۹۷	۸۸۶	۴۱۸۶	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Bio+Tour
۹/۲	۰/۸	۵۱	۳۴۱	۳۶۳/۵	۲۸۱	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour
۹/۴	۱/۲	۲۹	۲۷۶	۳۶۷	۴۳۳	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Tour+Gar
۲۷/۲	۱/۲	۶۷	۳۰۸	۵۸۶/۵	۷۳۲	◆	Qtz+K-Feld+Plg+Mica+Gar
۴/۷	۱۰/۹	۴	۱۲	۹۶/۵	۱۰۵۶	◆	Qtz+Tour±Mus

کتابنگاری

- دیدار، پ.، ۱۳۸۲- بررسی پترولوژیکی گرانیتوئیدهای جنوب مشهد با نگرشی بر ژئوشیمی عناصر خاکی کمیاب، پایان نامه کارشناسی ارشد پترولوژی، پژوهشکده علوم زمین طهری، ج. و قائمی، ف.، ۱۳۷۳- نقشه زمین شناسی مشهد با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- کریم پور، م. ح.، فارمر، ل. و استرن، ج.، ۱۳۹۰- ژئوشیمی رادیوایزوتوپها Rb-Sr و Sm-Nd، سن سنجی زیر کرن U-Pb و تعیین منشأ لیکو گرانیت های خواجه مراد، مشهد، ایران. مجله علوم زمین، شماره ۸۰: ۱۷۱-۱۸۲.
- میرزاد، ح.، ۱۳۷۰- پترولوژی گرانیت ها و پگماتیت های جنوب مشهد، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۲۵۹ صفحه.
- ولی زاده، م. و. و کریم پور، م. ح.، ۱۳۷۴- منشأ و موقعیت تکتونیکی گرانیت های جنوب مشهد، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۲۱، شماره ۱: ۷۱-۸۲.

References

- Baldwin, J. R. & Von Knorring, O., 1983- Compositional range of Mn-garnet in zoned granitic pegmatites. Can. Min., 21, 683-688.
- Černý, P. & Ercit, T. S., 1985- Some recent advances in the mineralogy and geochemistry of Nb and Ta in rare-element granitic pegmatites. Bull. Minéral. 108, 499-532.

- Černý, P. & Ercit, T. S., 2005- THE CLASSIFICATION OF GRANITIC PEGMATITES REVISITED, *The Canadian Mineralogist*, Vol. 43, P. 2005-2026.
- Černý, P. & Meintzer, R. E., 1988- Fertile granites in the Archaean and Proterozoic fields of rare-element pegmatites: crustal environment, geochemistry and petrogenetic relationships, In: Taylor RP, Strong DF (eds) *Recent Advances in the Geology of Granite-Related Mineral Deposits*. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Special Volume 39: 170–207.
- Černý, P., 1989b- Exploration strategy and methods for pegmatite deposits of tantalum. In *Lanthanides, Tantalum and Niobium* (P. Möller, P. Černý & F. Saupé, eds.). Springer- Verlag, Berlin, Germany (271-299).
- Černý, P., 1989a- Mineralogy of Rubidium and Cesium. In: Cerny, P. (ed.) *Anatomy and classification of granitic pegmatite in Science and Industry*. Mineralogical Assoc. Of Canada. Short Course Handbook, Vol.8, pp. 1-39.
- Černý, P., Goad, B. E., Hawthorne, F. C. & Chapman, R., 1986- Fractionation trends of the Nb- and Ta-bearing oxide minerals in the Greer Lake pegmatitic granite and its pegmatite aureole, southeastern Manitoba. *Am. Mineral.* 71,105-517.
- Černý, P., Trueman, D. L., Ziehlke, D.V., Goad, B. E. & Paul, B. J., 1981- The Cat Lake – Winnipeg River and the Wekusko Lake pegmatite fields, Manitoba. *Manitoba Energy & Mines, Econ. Geol. Rep.* ER80–1.
- Černý, P., 1995- Rare element granitic pegmatites - state of art and future prospects - Colloque International Mineralogie Fondamentale et appliquée à la memoire de Claude - Guillemin. *Documents B. R. G. M.*,243, pages 15 to 19.
- Galeschuk, C. & Vanstone, P., 2007- Exploration Techniques for Rare-Element Pegmatite in the Bird River Greenstone Belt, Southeastern Manitoba, In «Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration» edited by B. Milkereit, 2007, p. 823-839.
- Gordiyenko, V. V., 1971- Concentration of Li, Rb and Cs in potash feldspar and muscovite as criteria for assessing the rare metal mineralization in granitic pegmatites; *International Geological Review*, v.13, p. 134-142.
- Guilbert, J. M. & Park, C. F., 1997- *The Geology of Ore Deposits*. New York, Freeman.
- Harada, K., Honda, M., Nagashima, K. & Kanisawa, S., 1976- Masutomilite, manganese analogue of zinnwaldite, with special reference to masutomilite-lepidolite-zinnwaldite series. *Mineral. J. Japan* 8, 95-109.
- Henry, D. J. & Guidotti, C. V., 1985- Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: An example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine: *American Mineralogist*, v. 70, p. 1-15.
- Karimpour, M. H., Farmer, G. L. & Stern, C. R., 2009- Geochronology, Radiogenic Isotope Geochemistry, and Petrogenesis of Sangbast Paleo-Tethys Monzogranite, Mashhad, Iran, *Iranian Society Crystallography and Mineralogy*, Vol.17, No.4,winter 2009.
- Kuster, D., 2009- Granitoid-hosted Ta mineralization in the Arabian–Nubian Shield: Ore deposit types, tectono-metallogenetic setting and petrogenetic framework. *Ore Geology Reviews*.35, pp. 68-86.
- London, D., 1982- Stability of spodumene in acidic and saline fluorine-rich environments. *Carnegie Institution of Washington Year Book*, 81, 331-334.
- London, D., 1999- Stability of tourmaline in peraluminous granite systems: the boron cycle from anatexis to hydrothermal aureoles. Invited keynote lecture for special issue on tourmaline, proceedings of *Tourmaline 1997 (Czech Republic)*. *European Journal of Mineralogy*, 11, 253-262.
- London, D., Morgan, G. B. V. & Wolf, M. B., 1996- Boron in granitic rocks and their contact aureoles. Invited chapter for *Boron: Mineralogy, Petrology, and Geochemistry of Boron in the Earth's Crust* (E.S. Grew and L. Anovitz, eds.), *Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy*, 33, 299-330.
- Majidi, B., 1978- Etude petrostructural de la region de Mashhad (Iran), Les problemes de metamorphites, serpentinites et granitoides Hercynians: these *Universite Scientifique et Medicale de Grenoble, France*, 277p.
- Maniar, P. D. & Piccoli, P. M., 1989- Tectonic discrimination of granitoids: *Geol.Soc.Of Am.Bull.*,V.101,P.635-643.
- Mirnejad, H., 1991- Geochemistry and petrography of Mashhad granites and pegmatites, M.Sc. thesis, Tehran University.
- Morteani, G. & Gaupp, R., 1989- Geochemical evaluation of the tantalum potential of pegmatites; in *Lanthanides, tantalum and niobium*, Springer-Verlag, New York, p.303-310.
- Muller, A., Ihlen, P. M., Larsen, R. B., Spratt, J. & Seltnann, R., 2009- Quartz and Garnet Chemistry of South Norwegian Pegmatite and its implications for Pegmatite Genesis, *Estudos Geologicos*, Vol. 19, P. 20-24.
- Selway, J. B., Novák, M., Černý, P. & Hawthorne, F. C., 2000- The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba. XIII. Exocontact tourmaline. *Canadian Mineralogist*, 38, 869-976.
- Whitworth, M. P., 1992- Petrogenetic implications of garnets associated with lithium pegmatites from SE Ireland; *Mineralogical Magazine*, v.56, p.75-83.